



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Caracterización de la circulación superficial del mar en las proximidades del Delta del Ebro

Treball realitzat per:

Oriol Segura Morera

Dirigit per:

César Mössö Aranda

Marc Mestres Ridge

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 28/09/2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Página en Blanco

DEDICATORIA

A mi padre, Antonio Segura

Página en Blanco

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. César Möso por haberme guiado a lo largo de la realización de este trabajo y por su consejo tanto de carácter académico como personal.

Al Dr. Marc Mestres, tanto por su ayuda con los modelos numéricos como por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

A los profesores, personal administrativo y demás trabajadores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

A todos los compañeros y amigos que se cruzaron a lo largo de esta etapa.

Página en Blanco

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	5
4. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS (INSTRUMENTACIÓN)	7
4.1. Corrientes.....	7
4.1.1. Radar de alta frecuencia (HFR)	7
4.2. Viento	9
4.2.1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	9
4.2.2. Boya de Tarragona.....	10
5. MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	11
5.1. Día típico	11
5.2. Elipses de variabilidad	11
5.3. Correlación vectorial.....	12
5.4. Análisis espectral y coherencia.....	13
5.5. Análisis armónico	15
6. RESULTADOS.....	17
6.1. Viento	17
6.1.1. Análisis día típico.	17
6.1.2. Promedios y elipses de variabilidad.....	19
6.1.3. Correlación vectorial.....	22
6.2. Circulación Superficial	25
6.2.1. Circulación promedio	25
6.2.2. Elipses de variabilidad	35
6.2.3. Correlación vectorial entre el viento y las corrientes superficiales	41
6.2.4. Análisis espectral y coherencia.....	44
6.2.5. Análisis armónico	51
7. DISCUSIÓN.....	53
7.1. Viento	53
7.2. Corrientes superficiales	53
8. CONCLUSIONES.....	57
9. REFERENCIAS	59

Página en Blanco

FIGURAS

Figura 3.1: Delta del Ebro. Las líneas azules corresponden a la batimetría, expresada en metros. Los recuadros rojos indican la situación de los radares de alta frecuencia. Los puntos de color la cobertura temporal de los datos del HFR en % en el año 2014. Los cuadrados azules indican la posición de la boya (B1) y el puerto de la localidad de Tarragona (Lorente <i>et al.</i> 2016).....	5
Figura 4.1: Ejemplo de cobertura espacial de los datos generados por el radar de alta frecuencia durante el mes de enero. La barra de colores indica el porcentaje de datos de cada nodo y los puntos rojos muestran los nodos que tienen un mínimo del 85% de datos.....	8
Figura 4.2: Ejemplo de cobertura espacial de los datos de viento generados por el ECMWF.....	9
Figura 6.1: Localización del punto de estudio (en color azul) del análisis del día típico para el año 2014.....	17
Figura 6.2: Representación del análisis del día típico de las componentes U y V del viento para cada mes del año 2014. Cada punto está representado por una letra que corresponde las horas del día (A=00:00h, B=06:00h, C=12:00h, D=18:00h).....	18
Figura 6.3: Elipses de variabilidad para el año 2014 y las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño de los datos de viento del ECMWF en un nodo cercano a la costa.....	20
Figura 6.4: Elipses de variabilidad de los meses de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño de los datos de viento del ECMWF en un nodo cercano a la costa.....	22
Figura 6.5: Representación de la serie temporal del viento medido por la boya de Tarragona B1 para el mes de septiembre del año 2014.....	24
Figura 6.6: Representación de la serie temporal del viento medido por el ECMWF para el mes de septiembre del año 2014.....	24
Figura 6.7: Representación de las dos series temporales del viento. La línea azul indica la serie temporal medida por la boya de Tarragona B1 y la línea roja la medida por el ECMWF.....	25
Figura 6.8: Circulación promedio anual para la zona del Delta del Ebro durante el	

año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	26
Figura 6.9: Circulación promedio para la estación de invierno (enero, febrero y marzo) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	27
Figura 6.10: Circulación promedio para el mes de enero del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	27
Figura 6.11: Circulación promedio para el mes de febrero del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	28
Figura 6.12: Circulación promedio para el mes de junio del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	28
Figura 6.13: Circulación promedio para la estación de primavera (abril, marzo y junio) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	29
Figura 6.14: Circulación promedio para el mes de abril del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	29
Figura 6.15: Circulación promedio para el mes de mayo del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	30
Figura 6.16: Circulación promedio para el mes de junio del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	30
Figura 6.17: Circulación promedio para la estación de verano (julio, agosto y septiembre) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	31
Figura 6.18: Circulación promedio para el mes de julio del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	32
Figura 6.19: Circulación promedio para el mes de agosto del año 2014. Las flechas	

blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	32
Figura 6.20: Circulación promedio para el mes de septiembre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	33
Figura 6.21: Circulación promedio para la estación de otoño (octubre, noviembre y diciembre) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	34
Figura 6.22: Circulación promedio para el mes de octubre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	34
Figura 6.23: Circulación promedio para el mes de noviembre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.. ..	35
Figura 6.24: Circulación promedio para el mes de diciembre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.....	35
Figura 6.25: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para el año 2014. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.....	36
Figura 6.26: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de invierno del año 2014, compuesta por los meses de enero, febrero y marzo. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.....	37
Figura 6.27: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de primavera del año 2014, compuesta por los meses de abril, mayo y junio. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.....	38
Figura 6.28: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de verano del año 2014, compuesta por los meses de julio, agosto y septiembre. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.....	39
Figura 6.29: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación	

de otoño del año 2014, compuesta por los meses de octubre, noviembre y diciembre. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.....	40
Figura 6.30: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos una vez interpolados de las corrientes superficiales.....	41
Figura 6.31: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de invierno durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos una vez interpolados de las corrientes superficiales.....	42
Figura 6.32: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de primavera durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos una vez interpolados de las corrientes superficiales.....	42
Figura 6.33: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de verano durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos una vez interpolados de las corrientes superficiales.....	43
Figura 6.34: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de otoño durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos una vez interpolados de las corrientes superficiales.....	43
Figura 6.35: Representación de los dos puntos de estudio para el análisis espectral de los datos de viento y corrientes superficiales durante el año 2014.....	44
Figura 6.36a: Análisis espectral sin corregir de los datos de viento de la boya de Tarragona durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones producidas por la señal de entrada.....	45
Figura 6.36b: Análisis espectral sin corregir de los datos del nodo de corrientes superficiales durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones producidas por la señal de entrada.....	46

Figura 6.37a: Análisis espectral una vez aplicada la corrección o filtro (onda estacionaria) de los datos de viento de la boya de Tarragona durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones producidas por la señal de entrada.....	47
Figura 6.37b: Análisis espectral una vez aplicada la corrección o filtro (onda estacionaria) de los datos del nodo de corrientes superficiales durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones producidas por la señal de entrada.....	48
Figura 6.38: Análisis espectral definitivo de los datos de viento de la boya de Tarragona durante el año 2014.....	49
Figura 6.39: Análisis espectral definitivo para un nodo de la malla de los datos de corriente superficial durante el año 2014.....	49
Figura 6.40: Espectro cruzado entre los espectros del viento y las corrientes superficiales para los dos puntos representativos de la malla durante el año 2014.....	49
Figura 6.41: Variabilidad espacial de la coherencia entre los espectros del viento y las corrientes superficiales del año 2014. Los puntos negros muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales y la escala de colores indica la coherencia.....	51
Figura 6.42: Variabilidad de la corriente superficial explicada por la marea para el año 2014. La barra de colores indica el módulo de la velocidad total de la circulación superficial que es explicada por la corriente de marea. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.....	51

Página en Blanco

TABLAS

Tabla I: Meses que forman las diferentes estaciones del año 2014.....	19
Tabla II: Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio del viento para las diferentes estaciones del año 2014. <i>Mag</i> y <i>Dir</i> son la magnitud y dirección promedio del viento, S_u es el eje de mayor variabilidad, S_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre la magnitud promedio del viento y la desviación estándar del semieje mayor de la elipse, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.	21
Tabla III: Valores de la correlación vectorial entre la boya de Tarragona B1 y el punto más cercano a ella de los vientos generados por el ECMWF para todos los meses del año 2014. C es el coeficiente de correlación entre las dos series de tiempo y α el ángulo promedio de la segunda serie de tiempo respecto a la primera.	24
Tabla IV: Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio de la corriente superficial durante las diferentes estaciones del año 2014. <i>Mag</i> representa la magnitud promedio de la corriente superficial, S_u es el eje de mayor variabilidad, S_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre la magnitud promedio del viento y la desviación estándar del semieje mayor de la elipse, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.	40

Página en Blanco

1. INTRODUCCIÓN

El Delta del Ebro es una región peculiar de la costa catalana donde la variabilidad de la circulación está influenciada tanto por el efecto de los procesos locales y remotos generados por el viento, la marea y otros mecanismos de forzamiento, como por la configuración de la batimetría y la línea de costa. Dichos procesos tienen un impacto importante sobre las corrientes superficiales y, en consecuencia, a todo su entorno.

El Delta del Ebro es parte de uno de los ecosistemas acuáticos más grandes y con mayor biodiversidad del mar Mediterráneo occidental. El área del delta cercana a la costa experimenta una erosión severa debido tanto a factores naturales como inducidos por el ser humano. Los primeros están relacionados con la variedad de procesos marinos (por ejemplo la acción del oleaje) que impactan en la evolución de la costa (Palanques y Guillen, 1998), mientras que los antropogénicos incluyen construcciones de presas en la cuenca hidrográfica del Ebro, lo que lleva a una reducción drástica de la descarga de sedimentos y la consiguiente pérdida de superficie (Palanques et al. 2002).

Además, la circulación marina se caracteriza por tener una estructura complicada a causa de la topografía, la variabilidad estacional, la variabilidad del viento y la estratificación térmica del agua (Font et al. 1988b; Salat et al. 2002). Todos estos factores, sumados a la desembocadura del río Ebro generan remolinos cerca de su pluma que atrapan y transportan materiales suspendidos en el agua o contaminantes que pueden afectar la zona costera (Font *et al.* 1987).

Los conocimientos de la dinámica y los distintos forzamientos de la región son un poco limitados y muy recientes, ya que no es hasta finales del año 2013 que se conocen medidas reales en el espacio y tiempo de las corrientes superficiales. Estudios sobre la circulación (Lorente *et al.* 2016) y sobretodo observaciones de la zona mediante satélites, han mostrado que el esfuerzo del viento tiene una gran

importancia en las corrientes a gran escala. Sin embargo, los estudios de pequeña escala en la región son casi inexistentes, se conoce poco acerca de la importancia de la circulación inducida por las mareas o del posible impacto del viento fuera de la plataforma y cerca de la costa del delta, en particular de los remolinos que se generan y pueden tener un gran impacto para el medio ambiente y en las actividades costeras . Por ese motivo, y los descritos anteriormente, se cree que el área del Delta del Ebro es una región digna de un estudio más exhaustivo sobre la dinámica de su circulación y los procesos que la afectan.

En este estudio se analizaron datos temporales de viento y corrientes superficiales del año 2014 en las proximidades del Delta del Ebro mediante métodos de análisis numéricos con el propósito de evaluar, caracterizar y modelar tanto los patrones de circulación como los fenómenos que la afectan de manera mensual, estacional y anual. Destacar que el trabajo fue limitado a la superficie de los datos obtenidos y que muchos factores que pueden influir a las corrientes superficiales fueron excluidos. Una investigación más exhaustiva de la topografía y el impacto de entradas de agua dulce del río Ebro al mar mediterráneo merecerían ser estudiadas y podrían resultar útiles para complementar este estudio.

El trabajo consta de 8 capítulos o apartados y fue organizado de la siguiente manera: El apartado 2 detalla en mayor profundidad los objetivos. El apartado 3 presenta el área de estudio. El apartado 4 describe la instrumentación usada para sacar los datos temporales. El apartado 5 enseña las técnicas numéricas de análisis adoptadas para tratar los datos. El apartado 6 y 7 muestran los resultados y su discusión. Y por último, las conclusiones, que se encuentran en el apartado 8.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo se subdividieron en dos clases: objetivos generales y objetivos específicos.

Los objetivos generales son:

- Caracterizar la variabilidad de las corrientes superficiales en las proximidades del Delta del Ebro.
- Identificar los principales causantes, tanto locales como remotos, de la variabilidad encontrada.

Los objetivos específicos necesarios para alcanzar los objetivos generales son:

- Obtener, tratar y procesar datos de series temporales de viento y corrientes.
- Estudiar la variación de una variable 2D mediante elipses de variabilidad.
- Representar patrones de circulación promedio de una serie temporal.
- Interpolarse linealmente dos conjuntos de datos temporales para obtener la misma cobertura espacial.
- Comparar vectores de dos series de tiempo mediante el análisis de correlación vectorial y de coherencia.
- Encontrar las bandas de mayor energía de una serie temporal mediante un análisis espectral.
- Analizar la contribución de las principales frecuencias astronómicas de marea sobre la circulación mediante un análisis armónico.

Página en Blanco

3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio (Figura 3.1) se localiza en la región noreste de la Península Ibérica, entre las latitudes 40° 24' y 41° 12' norte (N) y las longitudes 0° 30' y 1° 30' este (E) de la costa catalana, y centrada en el Delta del Ebro.

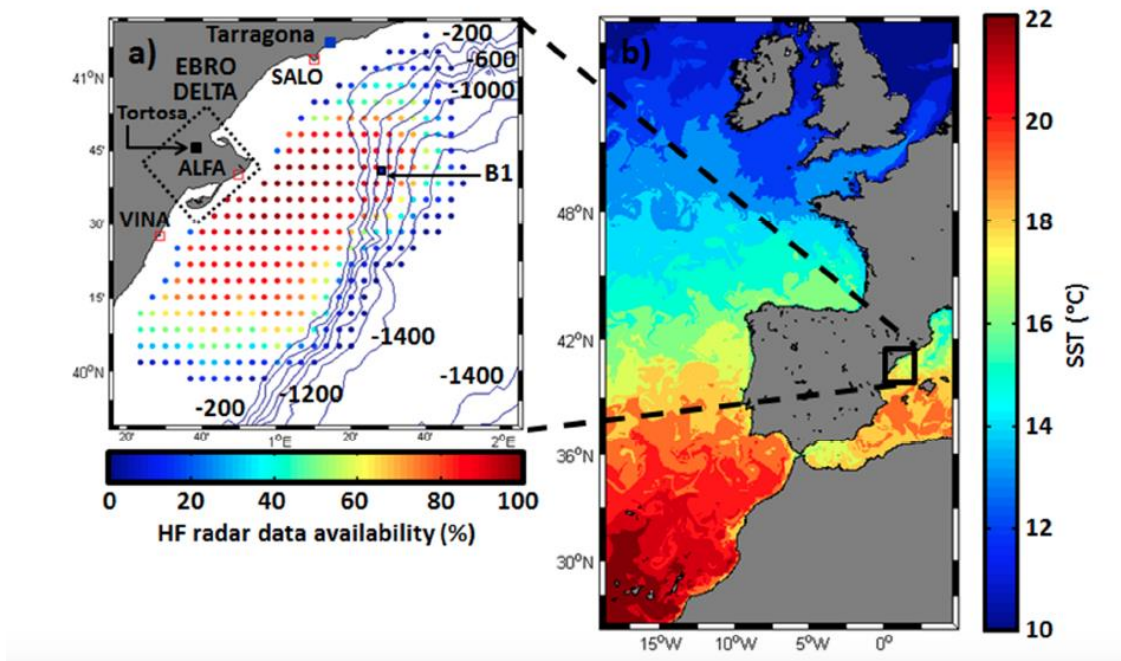


Figura 3.1: Delta del Ebro. Las líneas azules corresponden a la batimetría, expresada en metros. Los recuadros rojos indican la situación de los radares de alta frecuencia. Los puntos de color la cobertura temporal de los datos del HFR en % en el año 2014. Los cuadrados azules indican la posición de la boya (B1) y el puerto de la localidad de Tarragona (Lorente *et al.* 2016).

La circulación en la plataforma del Delta del Ebro es principalmente termohalina y se caracteriza por una corriente barotrópica casi permanente que fluye hacia el suroeste. Esta corriente, llamada ‘Corriente Norte’, está en equilibrio geostrófico con el frente catalán, un frente de densidad permanente asociado a fuertes gradientes de salinidad (Font *et al.* 1988a). Este flujo general solo se ve alterado por oscilaciones inerciales en el sentido de las agujas del reloj (con máximas durante las estaciones más cálidas) y algunos periodos cortos de reversiones de corriente, relacionados con eventos mesoescalares como remolinos (Grifoll *et al.* 2015; Garreau *et al.* 2011; Birol *et al.* 2010; Font *et al.* 1990). La intensidad media de las corrientes es relativamente

baja, $10\text{-}20\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, y aumenta en otoño a causa tanto de la intensificación de la actividad mesoescalar como de la variabilidad local del viento (Font *et al.* 1995).

La circulación marina cercana al delta, dominada por la dinámica costera, presenta una estructura compleja muy influenciada por la topografía y también por la variabilidad estacional de las descargas del río Ebro, las cambiantes condiciones del viento y la estratificación térmica del agua (Font *et al.* 1988b; Salat *et al.* 2002). La entrada de grandes flujos de agua dulce, especialmente durante la primavera, junto con los efectos de la batimetría, conduce al desarrollo de remolinos anticiclónicos en ambos lados del delta y refuerzan el frente de circulación hacia el sur (Carrillo *et al.* 2008; Salat *et al.* 2002; Font *et al.* 1990).

Al norte del delta, el flujo originado en la desembocadura del río tiende a fluir hacia el noroeste, pero la confluencia con la corriente principal y la influencia topográfica generan un remolino en el sentido de las agujas del reloj. Este remolino, atrapa materiales suspendidos en el agua y contaminantes orgánicos de origen industrial procedentes de la zona industrial de Tarragona (Font *et al.* 1987). Por lo tanto, la pluma del río Ebro juega un papel muy importante en el transporte y dispersión de la contaminación antropogénica en la zona costera.

Por otra parte, el régimen eólico en la región se puede clasificar en tres grupos principales:

- Vientos de noroeste, llamados *Mistral*: Son dominantes durante la estación de invierno. Son los vientos más intensos (hasta 100 km/h) y más persistentes.
- Vientos de suroeste, llamados *Garbís*. Son vientos típicos de la estación de verano, muy cálidos, débiles y variables.
- Vientos llamados *Gregal* o *Llevants*. Son vientos relacionados con las tormentas generadas en la cuenca del Mediterráneo occidental que principalmente provienen del NE y E.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS (INSTRUMENTACIÓN)

Para entender la dinámica marina superficial en la zona del Delta del Ebro se necesita identificar y caracterizar los mecanismos de forzamiento que dominan su comportamiento en el espacio y el tiempo para de este modo, encontrar la variabilidad que generan sobre la circulación superficial. Con este objetivo, en este trabajo se usaron datos de 3 radares de alta frecuencia CODAR (13,5 MHz) situados en las localidades de Salou, Vinaroz y Alfacada, mediante los cuales se generaron datos horarios de la dirección y la magnitud de las corrientes superficiales para el año 2014 en una malla de resolución espacial de 5 km. Por otro lado, también se utilizaron datos de viento cada 6 horas procedentes del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* y de una boya (B1) del Ente Público Puertos del Estado situada enfrente del puerto de Tarragona (Figura 3.1).

4.1. Corrientes

4.1.1. Radar de alta frecuencia (HFR)

Los radares de alta frecuencia (HFR) miden corrientes superficiales en el primer metro de la superficie del océano. Emiten pulsos electromagnéticos que interactúan con las ondulaciones de la superficie del mar. Esta interacción es conocida como retroesparcimiento Doppler y genera una diferencia entre la frecuencia de la señal emitida y la frecuencia de la señal recibida (Crombie, 1955). Esta diferencia de la señal se consigue a partir de la relación de dispersión de las ondas y se utiliza para estimar la velocidad de las corrientes superficiales (que se alejan o se acercan al transmisor) en dirección radial. (Flores-Vidal *et al.* 2011). Combinando observaciones desde diferentes puntos, se pueden obtener las dos componentes de la velocidad.

En diciembre de 2013 se desplegó en el Delta del Ebro un sistema de radares de alta frecuencia CODAR (<http://www.codar.com>) de rango estándar en el marco del proyecto RIADE (Redes de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro), propiedad del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente de España (www.magrama.gob.es) y

operado por Puertos del Estado (PPEE) con fines científicos. La red de radares de alta frecuencia se conforma de 3 radares remotos en tierra situados en Salou, Vinaroz y Alfacada, que operan a una frecuencia nominal de 13,5 MHz con un ancho de banda de 90 KHz (Lipa *et al.* 2006; Kohut and Glenn, 2003). Cada sitio proporciona mediciones horarias de la velocidad representativa en el primer metro superior de columna de agua.

En este estudio se cogieron los datos horarios obtenidos durante el año 2014 que conformaron los 3 radares de alta frecuencia. Los datos de corriente superficial obtenidos por los radares se ajustaron a una malla de 1069 nodos espaciados aproximadamente 5 kilómetros. Para este estudio se hicieron una serie de pruebas para conseguir la mejor cobertura espacial de los datos de corriente superficial. Se decidió tomar solo los nodos que tuvieran como mínimo el 85% de cobertura temporal ya que se vio que escogiendo valores superiores se tenía poca representación espacial (pocos nodos con medidas válidas) y escogiendo valores inferiores se tenía poca representatividad temporal (demasiados nodos con medidas no válidas). En la figura 4.1 se representa la cobertura espacial de los datos generados por el radar de alta frecuencia durante el año 2014.

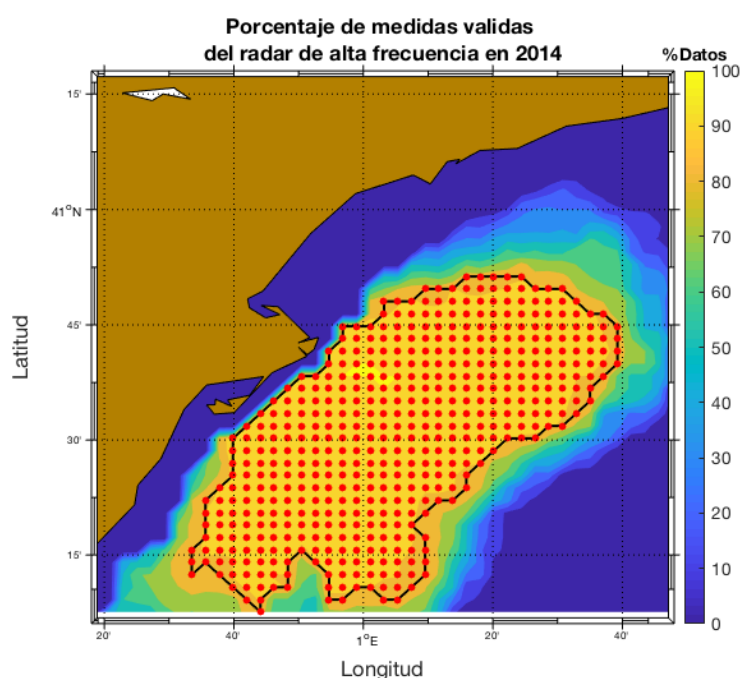


Figura 4.1: Ejemplo de cobertura espacial de los datos generados por el radar de alta frecuencia durante el mes de enero. La barra de colores indica el porcentaje de datos de cada nodo y los puntos rojos muestran los nodos que tienen un mínimo del 85% de datos.

4.2. Viento

4.2.1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

Los datos temporales del viento se obtuvieron del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (<https://www.ecmwf.int>), una organización intergubernamental independiente integrada por 21 Estados miembros europeos y 13 Estados asociados creada en 1975. El ECMWF usa un modelo numérico de predicción meteorológica para predecir el tiempo a partir del estado presente de la atmósfera. Para ello los modelos deben recibir un flujo constante de información meteorológica, a partir de los datos proporcionados por satélites y sistemas de observación terrestre. Estos datos alimentan las bases de datos del centro para producir:

- Predicciones para el medio plazo (predicción del tiempo hasta 15 días en el futuro).
- Predicciones para los próximos meses.
- Predicciones para las próximas estaciones.

En este caso, el centro meteorológico proporcionó datos temporales de las componentes vectoriales del viento cada 6 horas de cada día y mes del año 2014 en varios puntos de nuestra zona de estudio separados entre si 25 *km*. (Figura 4.2).

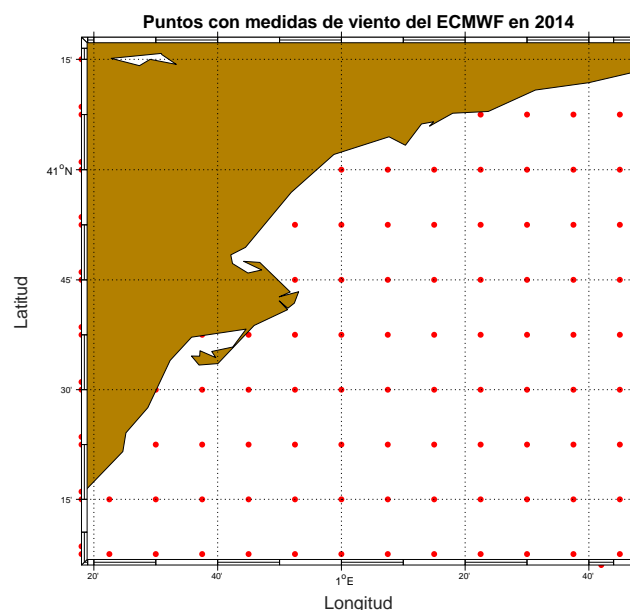


Figura 4.2: Ejemplo de cobertura espacial de los datos de viento generados por el ECMWF.

4.2.2. Boya de Tarragona

La cobertura espacial del conjunto de radares de alta frecuencia de Salou, Vinaroz y Alfacada incluye una boya oceánica instalada en agosto de 2004: la boya de Tarragona, situada en 40.68° N, 1.47° E a 688 metros de profundidad (Punto B1 en la Figura 3.1). La boya pertenece a la red española de boyas de aguas profundas y está equipada con un PCM acústico (un formato de codificación digital del sonido sin compresión que simultáneamente captura y muestrea señales analógicas y las transforma en señales digitales, *Pulse Code Modulation*) que proporciona las medidas horarias de las velocidades promedio del viento. El error instrumental está alrededor de $0.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Señalar que en el año 2014, la boya sufrió breves interrupciones de comunicación durante algunos meses del año que provocaron una serie de brechas cortas de tiempo (2-3 horas) que fueron interpoladas (Lorente *et al.* 2016). Por lo tanto, el viento obtuvo registros completos desde el 1 de mayo al 31 de octubre, dejando los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre con un menor número de datos (incompletos).

5. MÉTODOS DE ANÁLISIS

5.1. Día típico

La técnica del día típico calcula los valores medios mensuales para cada hora del día de una serie de tiempo de las componentes vectoriales del viento con el propósito de definir un patrón diario de comportamiento (e.g., régimen de brisas).

$$\overline{R}_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M R_{ij} \quad (5.1)$$

donde R representa la componente vectorial (en nuestro caso la velocidad), i la hora del día ($i=6,12,18,24$), j el día del mes ($j=1,2,3,4,\dots,31$) y M el número total de días del mes. Este método permite ver el comportamiento del viento al largo del día.

5.2. Elipses de variabilidad

Se define una elipse de variabilidad rotando los datos que componen una serie de tiempo a su eje principal para después obtener los parámetros de la elipse mediante la técnica propuesta por Emery y Thompson (1998). Si las variables $u(t)$ y $v(t)$ representan las componentes de un vector velocidad $\vec{V}(t)$, y u' y v' representan las componentes de las anomalías de las series de tiempo con respecto a sus medias u y v , se define que:

$$\overline{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n \quad (5.2)$$

$$\overline{v} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n \quad (5.3)$$

$$u' = u(t) - \overline{u} \quad (5.4)$$

$$v' = v(t) - \bar{v} \quad (5.5)$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u'v'(t_n) \quad (5.6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\overline{u'v'}}{\overline{u'^2} - \overline{v'^2}} \right] \quad (5.7)$$

$$\left. \begin{matrix} \lambda_u \\ \lambda_v \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} \right) \pm \left[\left(\overline{u'^2} - \overline{v'^2} \right)^2 + 4(\overline{u'v'})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5.8)$$

donde C es la covarianza de los datos, θ es la orientación del eje mayor de la elipse y λ_u y λ_v corresponden a la variabilidad que tienen cada una de las componentes. Relacionando dichas variabilidades de la elipse se obtiene el índice π , que representa la excentricidad de la elipse y la variabilidad de la dirección del vector $\vec{V}(t)$.

$$\pi = \frac{\lambda_v}{\lambda_u} \quad (5.9)$$

Además, con la intención de contrastar la magnitud promedio y la variabilidad de la serie de tiempo vectorial $\vec{V}(t)$, se normaliza la magnitud promedio con la desviación estándar del eje principal de la elipse, de tal manera que valores más grandes que 1 indican que la magnitud promedio de la corriente domina sobre la variabilidad, mientras que valores más pequeños a 1 indican que la variabilidad domina sobre la magnitud promedio de la corriente. Este parámetro se denomina β .

$$\beta = \frac{\sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2}}}{\lambda_u} \quad (5.10)$$

5.3. Correlación vectorial

La correlación vectorial entre los datos de viento del ECMWF y los nodos de la malla con datos de corrientes superficiales proporcionados por los radares de alta frecuencia se calculó siguiendo el método propuesto por Kundu (1976):

$$w = u - iv \quad (5.11)$$

$$C_{vec}(x_1, x_2, \tau) = \frac{w_1^*(t)w_2(t + \tau)}{\left[(w_1^*(t)w_1(t))^{\frac{1}{2}}(w_2^*(t)w_2(t))^{\frac{1}{2}}\right]} \quad (5.12)$$

donde w representa la forma compleja de la velocidad (ya sea corriente superficial o viento), $*$ denota el conjugado del complejo, τ es el desfase en el tiempo y C_{vec} es el coeficiente de correlación entre las dos series de tiempo w_1 y w_2 . La fase α es el ángulo promedio de la segunda serie de tiempo respecto a la primera:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_1 v_2 - u_2 v_1}{u_1 u_2 + v_1 v_2} \right) \quad (5.13)$$

5.4. Análisis espectral y coherencia

Con el objetivo de encontrar qué frecuencias contienen mayor energía en una serie de tiempo, se realizó un análisis espectral mediante un filtrado por medio de una función ventana que elimina la energía contenida en frecuencias no deseadas (como cuando se tiene un efecto de marea importante en la zona de estudio o el caso de ondas largas, normalmente con frecuencias menores de 0.02 Hz) y la transformada discreta de Fourier por medio de una función del periodograma promedio de Welch (Emery y Thompson, 1998).

Por un lado, para realizar el filtrado (o corrección espectral) de ondas largas, se acepta que la señal a analizar está formada por una suma de ondas sinusoidales, de manera que puede ser representada por:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N/2} [a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \sin(2\pi f_n t)] \quad (5.14)$$

donde a_n y b_n son los coeficientes de Fourier.

Posteriormente, se aplica la corrección a los datos que la conforman. Dicha operación es conocida como la aplicación de una función ventana y se expresa como:

$$\eta(t_*) \rightarrow b(t_*) \eta(t_*), \text{ tal que } t_* = 1, 2, \dots, N \quad (5.15)$$

donde $b(t)$ se conoce como profundidad de peso y viene dada por:

$$b(t_*) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t_*}{l}\right) \right] & 0 < t_* < l \\ 1 & l \leq t_* \leq N - l \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(N - t_*)}{l}\right) \right] & N - l < t_* \leq N \end{cases} \quad (5.16)$$

Por otro lado, la técnica del periodograma promedio de Welch (Emery y Thompson, 1998) particiona una serie de tiempo en segmentos con el mismo número de datos para calcular los periodogramas en cada uno.

$$X(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-i2\pi f_n \Delta t} \right|^2 \quad (5.17)$$

donde $X(f)$ es el resultado de aplicar un análisis de Fourier sobre cada una de las particiones, N corresponde al número de datos que integran una partición y f_n corresponde a las frecuencias que componen los periodogramas, donde $f_n = \frac{\pm n}{N\Delta t}$.

Para realizar el análisis de coherencia es necesario aplicar la técnica de espectros cruzados:

$$S_{xy} = X(f)Y(f) \quad (5.18)$$

$$S_{xx} = X(f)X(f) \quad (5.19)$$

$$S_{yy} = Y(f)Y(f) \quad (5.20)$$

donde $X(f)$ y $Y(f)$ corresponden a los periodogramas de las series de tiempo a comparar. S_{xy} es el producto de los espectros cruzados entre $X(f)$ y $Y(f)$, mientras que S_{xx} y S_{yy} corresponden a sus autoespectros. Finalmente la coherencia viene dada por:

$$C^2 = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (5.21)$$

5.5. Análisis armónico

Con el objetivo de ver la contribución de las principales frecuencias astronómicas de la marea sobre la circulación superficial en la zona del Delta del Ebro, se realizó un análisis armónico sobre la serie de tiempo de cada uno de los nodos de la malla. El análisis se efectúa en base al método propuesto por Godin (1988):

$$w(t) = u_0 + \sum_{k=1}^K u_k \cos(\sigma_k t - b_k) + n_x(t) + i \left[v_0 + \sum_{k=1}^K v_k \cos(\sigma_k t - c_k) + n_y(t) \right] \quad (5.22)$$

donde k es el k -ésimo constituyente de la marea y K el total de constituyentes con amplitud u_k y v_k , σ_k es la frecuencia y b_k y c_k corresponden a la fase. Las variables n_x y n_y representan la contribución de diferentes procesos no atribuidos a la marea en las direcciones este-oeste y norte-sur respectivamente.

Página en Blanco

6. RESULTADOS

Se describe un análisis de los datos de la dirección y la magnitud del viento del ECMWF y se muestran las variaciones que presentaron los datos de corriente superficial en las diferentes estaciones del año. Seguidamente se estudia la influencia del viento sobre las corrientes superficiales en la zona de estudio.

6.1. Viento

6.1.1. Análisis día típico.

El viento tiene un papel muy importante en la dinámica oceánica ya que es uno de los principales aportes de energía al océano. Teniendo esto en cuenta, se utilizaron datos de viento cada 6 horas de un punto cercano a la costa del delta (Figura 6.1) para las estaciones climáticas del año 2014 con la finalidad de ver variaciones del sistema de brisas (Figura 6.2).

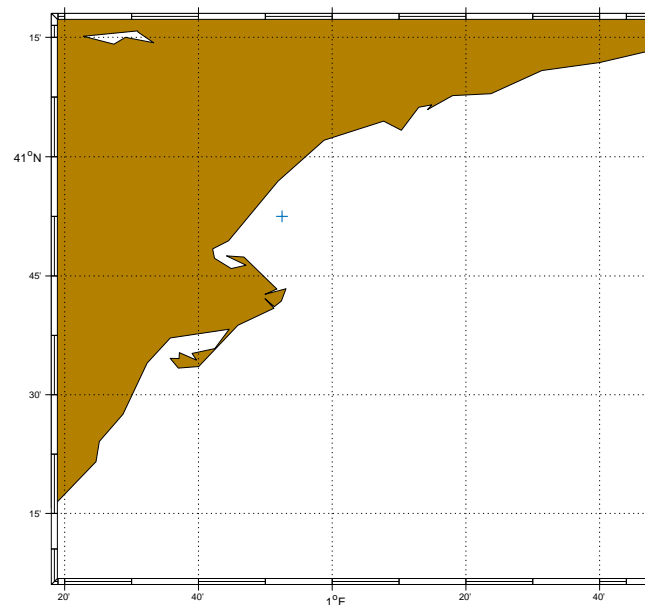


Figura 6.1: Localización del punto de estudio (en color azul) del análisis del día típico para el año 2014.

Se puede observar que las componentes vectoriales del viento (Figura 6.2) durante los meses de invierno (enero, febrero y marzo) resultaron en vientos bastante intensos de la costa hacia el mar tanto durante el día como durante la noche. Algo parecido

pero con alguna diferencia en las horas nocturnas ocurrió durante los meses de primavera (abril, mayo y junio) con vientos más moderados de la costa hacia el mar durante el día y casi paralelos a la costa durante la noche.

En cambio, los meses de verano (julio, agosto y septiembre) presentaron vientos moderados del mar a la costa durante la noche y la mayor parte del día. Por último, se distinguió durante los meses de otoño (octubre, noviembre y diciembre) vientos un poco más intensos provenientes del SE durante la mayor parte del día y paralelos a la costa durante la noche.

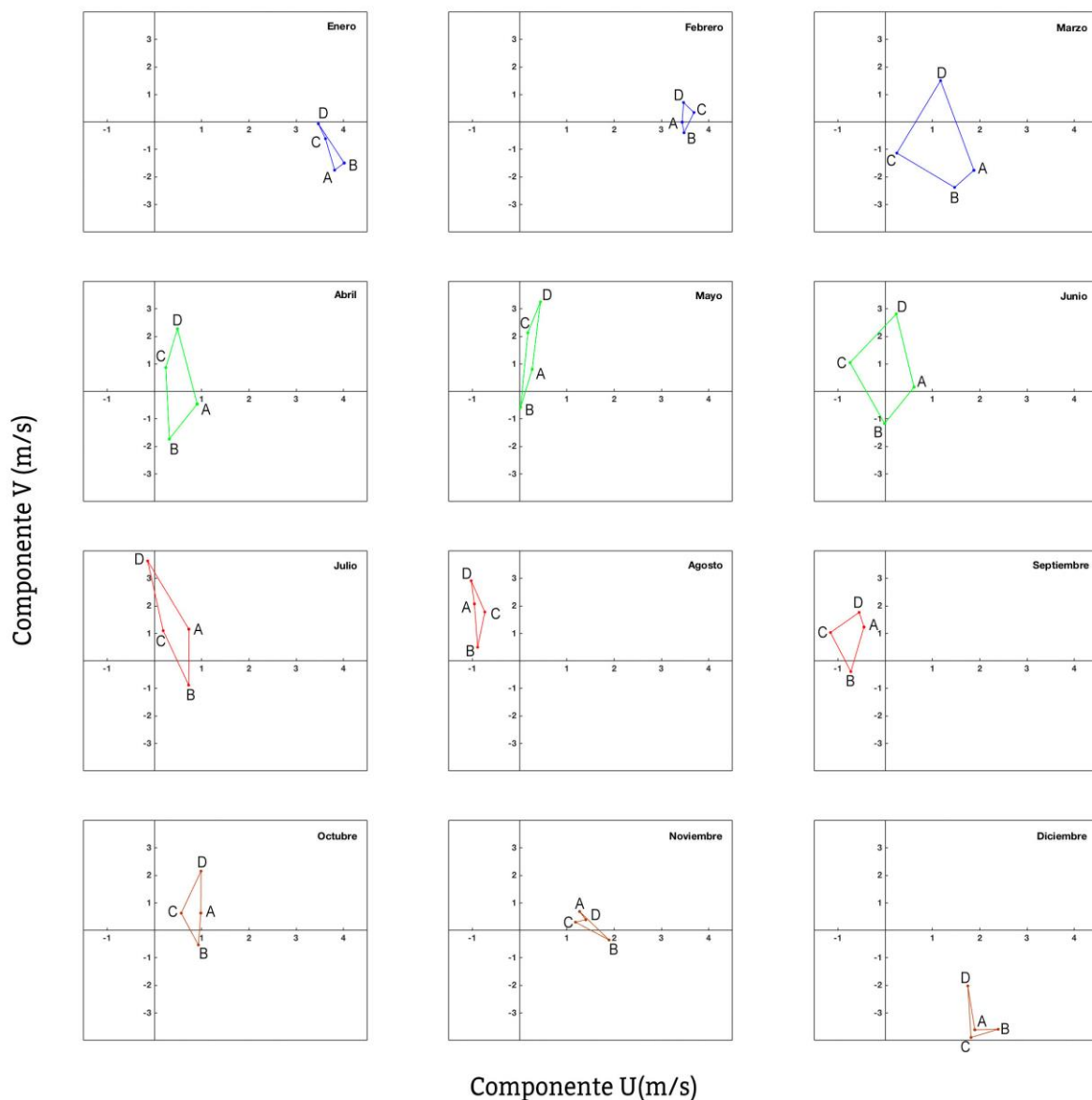


Figura 6.2: Representación del análisis del día típico de las componentes U y V del viento para cada mes del año 2014. Cada punto está representado por una letra que corresponde a las horas del día (A=00:00h, B=06:00h, C=12:00h, D=18:00h).

Con este análisis se determinaron las estaciones del año formadas por meses específicos como se puede ver en la Tabla I.

Tabla I: Meses que forman las diferentes estaciones del año 2014.

Estación	Meses
Invierno	Enero
	Febrero
	Marzo
Primavera	Abril
	Mayo
	Junio
Verano	Julio
	Agosto
	Septiembre
Otoño	Octubre
	Noviembre
	Diciembre

6.1.2. Promedios y elipses de variabilidad

Para analizar el comportamiento promedio del viento y su variación cerca de la costa (día típico, sistema de brisas,...), se presenta un estudio anual y estacional en términos de elipses de variabilidad con los datos de viento generados por el ECMWF en el mismo punto utilizado en el apartado anterior (Figura 6.1).

La magnitud promedio anual del viento modelado fue de $4.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en dirección SW. Al comparar el vector promedio anual con su elipse de variabilidad, el parámetro β igual a 0.18 indica que la variabilidad del viento fue más importante que la velocidad promedio, con una desviación estándar en el semieje de mayor variabilidad de $9.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La elipse de variabilidad anual también tiene una excentricidad de 0.43, por lo que su forma fue más elíptica que circular, con el eje de máxima variabilidad orientado en la dirección del viento (Figura 6.3 y Tabla II).

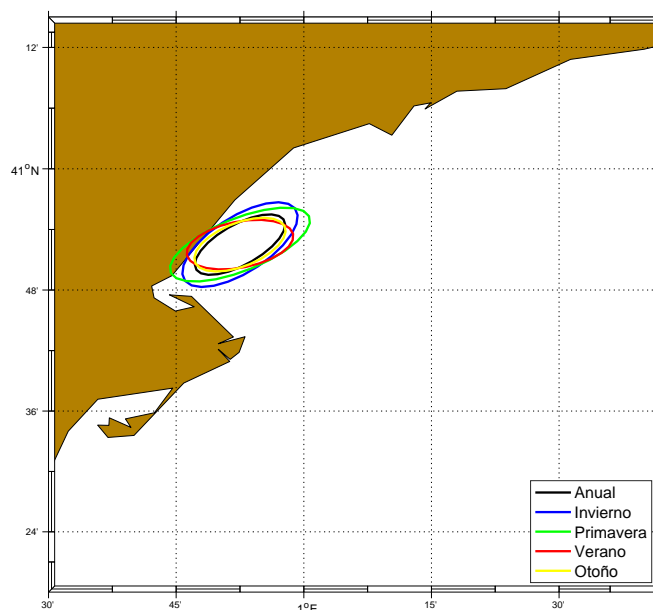


Figura 6.3: Elipses de variabilidad para el año 2014 y las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño de los datos de viento del ECMWF en un nodo cercano a la costa.

Al comparar entre las elipses de variabilidad del viento en las diferentes estaciones del año 2014 (Figura 6.3), se observaron que las mayores variabilidades se presentan durante el invierno y el otoño con excentricidades de 0.44 y 0.49, y unas desviaciones estándar en el semieje de mayor variabilidad de 30.30 y 21.81 $m \cdot s^{-1}$. Comparando las magnitudes promedio del viento con las direcciones del eje de mayor variabilidad de las elipses, los parámetros β mostraron un dominio de la variabilidad con un índice de 0.15 y 0.19. La estación de invierno fue la que presentó la mayor magnitud promedio del viento seguido de la de otoño, con las direcciones orientadas al eje de mayor variabilidad de las elipses. Esto nos dice que una parte importante de la variabilidad vino en forma paralela a la dirección promedio del viento.

Durante la primavera la elipse presentó una excentricidad de 0.38, con una desviación estándar en el semieje de mayor variabilidad de 16.88 $m \cdot s^{-1}$, lo que indica una disminución de la variabilidad del viento respecto al invierno y al otoño. La magnitud promedio fue de 3.41 $m \cdot s^{-1}$ y hubo un pequeño aumento del parámetro β (Tabla II).

Finalmente, en la estación de verano es donde se encontró la menor variabilidad del año con una elipse que mostró una excentricidad de 0.47 y una desviación

estándar de $12.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el semieje de mayor variabilidad. Por otra parte, la magnitud promedio del viento fue de $2.98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La disminución, aunque poco significativa, de la variabilidad del viento fue analizada mediante el parámetro β , con un valor de 0.25, casi el doble de su valor en invierno (0.15, Tabla II).

Tabla II: Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio del viento para las diferentes estaciones del año 2014. **Mag** y **Dir** son la magnitud y dirección promedio del viento, S_u es el eje de mayor variabilidad, S_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre la magnitud promedio del viento y la desviación estándar del semieje mayor de la elipse, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.

	Mag (ms^{-1})	Dir	S_u (ms^{-1})	S_v (ms^{-1})	β	π	θ (°)
Anual	4.05	SW	23.04	9.80	0.18	0.43	32.88
Invierno	4.68	SW	30.30	13.40	0.15	0.44	36.46
Primavera	3.41	WSW	16.88	6.42	0.20	0.38	24.70
Verano	2.98	WSW	12.09	5.69	0.25	0.47	12.73
Otoño	4.03	WSW	21.81	10.62	0.19	0.49	24.94

Cabe añadir que aunque el viento presenta variabilidad estacional se esperaba ver más diferencias entre las estaciones de invierno y verano, con un sistema de brisas estivales bien marcado, con elipses orientadas con el semieje mayor más o menos perpendicular a la costa, ya que el viento es cíclicamente de tierra hacia el mar y del mar hacia tierra (no hay mucha contribución paralela a la costa). No obstante, es probable que la resolución temporal de los datos, cada 6 horas, y la distancia del punto analizado a la costa, más de 5 km, pudieran diluir o suavizar este efecto. Por otro lado, analizando los meses que componen cada estación del año, sí que se observó un sistema similar a brisas bien marcado durante el mes de marzo en invierno y durante los meses de agosto y septiembre en verano, dejando los meses de las estaciones de primavera y otoño como transicionales (Figura 6.4).

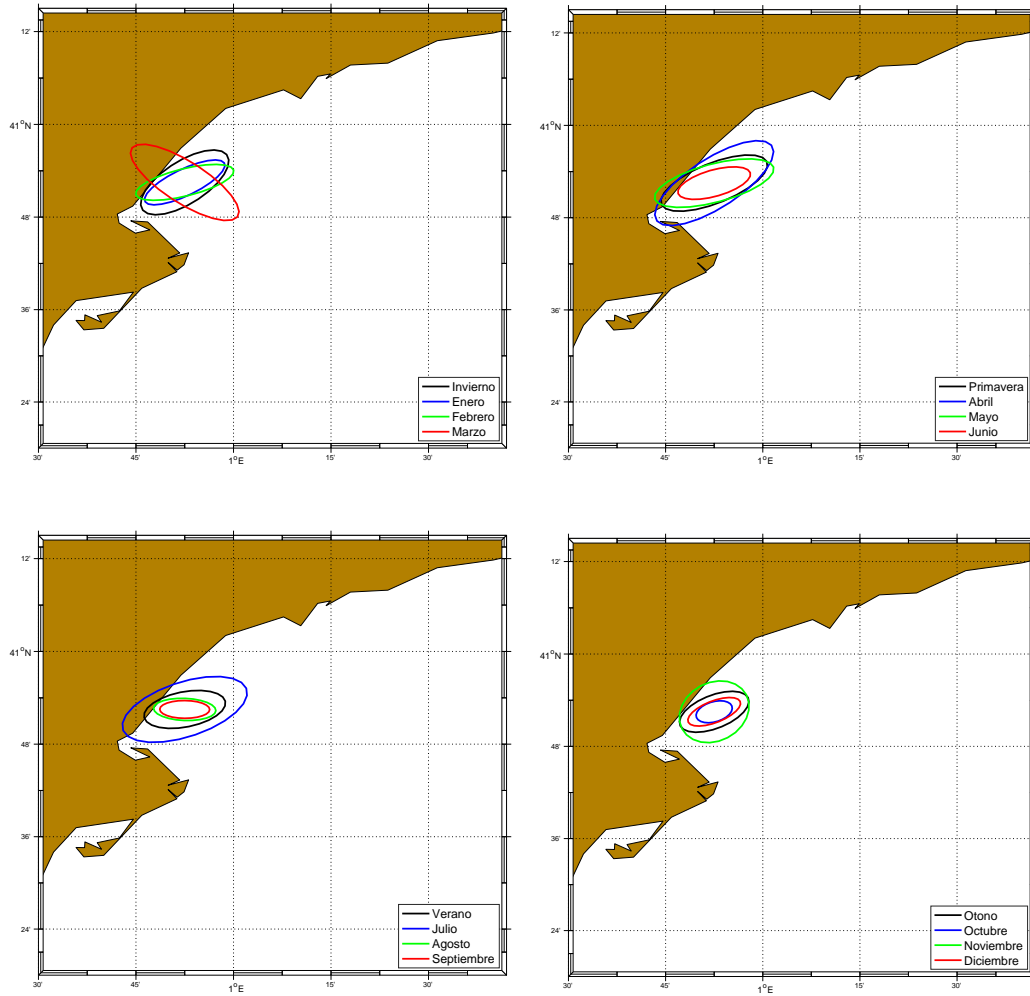


Figura 6.4: Elipses de variabilidad de los meses de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño de los datos de viento del ECMWF en un nodo cercano a la costa.

6.1.3. Correlación vectorial

Con el objetivo de evaluar la validez de los datos de viento utilizados, se ha hecho una comparación entre los datos de viento medidos en la boya de Tarragona B1 y los datos de viento generados por el ECMWF en el punto más cercano a ella. Dicha comparación se ha llevado a cabo mediante la correlación vectorial entre las series de tiempo medidas y modeladas.

La correlación vectorial es un técnica que compara vectores de dos series de tiempo S_1 y S_2 mediante dos parámetros: el coeficiente de correlación c y el ángulo de fase α . Por un lado, el coeficiente de correlación determina la fuerza de la relación entre los datos de las dos variables en un intervalo de $[0,1]$, donde los valores

próximos a 1 indican que la relación es fuerte y los valores próximos a 0 que no lo es. Por otro lado, la fase mide la dirección o sentido de la relación de una variable contra la otra con ángulos entre 0° y 180° , donde ángulos positivos señalan que una de las variables (S_2) gira a la derecha de la otra (S_1) y ángulos negativos que S_2 gira a la izquierda de S_1 .

Se observa que en el punto de estudio, la mayor amplitud de la correlación fue entre 0.5 y 0.8 con un mejor acoplamiento entre las series de tiempo durante los meses de invierno seguido de valores bajos (entre 0.3 y 0.5) en verano. Destacar que durante los meses que la boya tuvo un fallo operativo y dio datos incompletos, la correlación en algunos meses fue mayor. En cambio, en los meses que tenemos datos completos, la correlación por lo general fue menor. Dicho comportamiento, no es típico ya que donde tenemos los datos completos se esperaba ver una correlación vectorial mejor. No obstante, los efectos de viento más intensos en invierno y menos intensos en verano pudieron provocar que se produjese el efecto contrario al esperado, dando correlaciones vectoriales más grandes en los meses donde la boya no estuvo operativa al 100%.

En cuanto a la relación vectorial de la dirección, se observó un sentido de rotación horario de los vectores en invierno que cambio de tendencia a partir de la estación de primavera. Este cambio de sentido fue creciendo hasta llegar a su máximo en verano para después disminuir hasta sus valores más bajos durante el otoño. Este comportamiento evidenció que la dirección de los vectores de ambas series temporales tienen mayor relación durante el otoño y parte del invierno (mes de marzo) con ángulos que van de 50° a 80° y menos relación en verano con ángulos que llegan hasta 137° . (Tabla III).

Tabla III: Valores de la correlación vectorial entre la boya de Tarragona B1 y el punto más cercano a ella de los vientos generados por el ECMWF para todos los meses del año 2014. C es el coeficiente de correlación entre las dos series de tiempo y α el ángulo promedio de la segunda serie de tiempo respecto a la primera.

Mes	c	α ($^{\circ}$)
Enero	0.7771	165.5572
Febrero	0.6274	159.3875
Marzo	0.2809	-81.4883
Abril	0.3609	-100.0715
Mayo	0.3093	-117.7646
Junio	0.2188	-139.2680
Julio	0.3513	-135.3046
Agosto	0.3950	-137.3735
Septiembre	0.5049	-117.3904
Octubre	0.4475	-120.6066
Noviembre	0.1246	-60.3977
Diciembre	0.4036	-54.0930

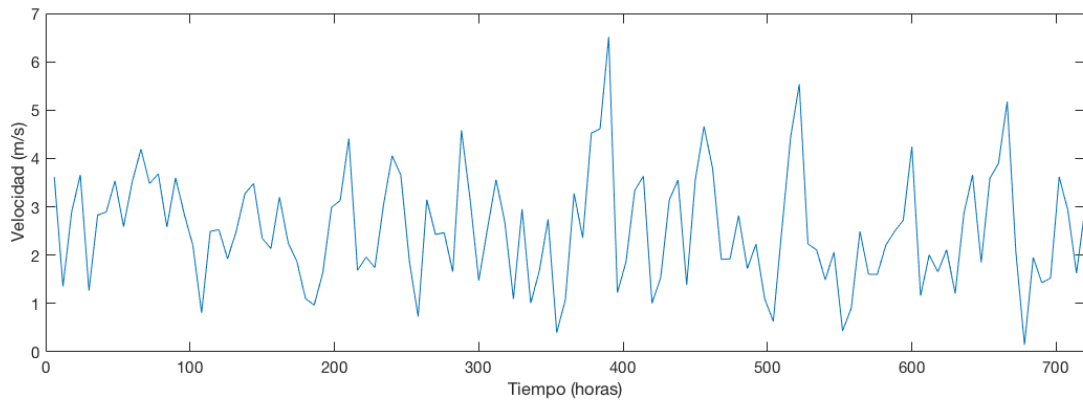


Figura 6.5: Representación de la serie temporal del viento medido por la boya de Tarragona B1 para el mes de septiembre del año 2014.

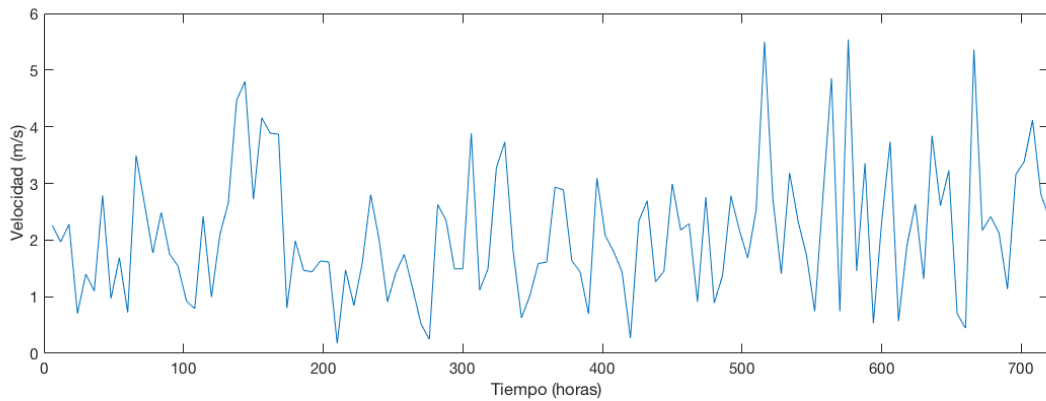


Figura 6.6: Representación de la serie temporal del viento medido por el ECMWF para el mes de septiembre del año 2014.

Si se superponen ambas series temporales en un mismo gráfico (Figura 6.7) se puede observar que, aunque haya muchos picos coincidentes, en general los puntos no son concurrentes. Comportamiento que confirma la correlación vectorial para esta estación del año con un coeficiente de correlación de 0.50.

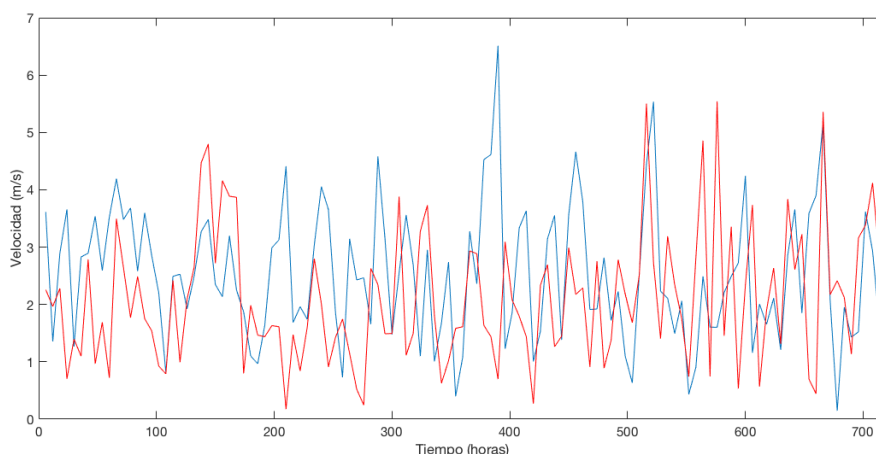


Figura 6.7: Representación de las dos series temporales del viento. La línea azul indica la serie temporal medida por la boya de Tarragona B1 y la línea roja la medida por el ECMWF.

6.2. Circulación Superficial

6.2.1. Circulación promedio

Con el objetivo de evaluar la variabilidad del comportamiento de la circulación superficial en el delta a lo largo del año, se graficaron mapas promedio de las corrientes obtenidas por los radares de alta frecuencia.

El promedio anual de las corrientes superficiales (Figura 6.8) mostró un flujo predominante de agua proveniente del noreste consistente con la corriente de mesoescala típica de la zona, con velocidades más intensas ($35 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) en la región más expuesta al mar Mediterráneo, y de menor intensidad ($10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) en la región más cercana a la costa del delta. También se observó una segunda corriente de agua de menor intensidad ($15\text{-}20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) originada en la cercanía del delta y probablemente debida a la interacción de las corrientes con el contorno sólido formado por la línea de costa. Dicha corriente, con dirección al sureste, acabó uniéndose con el flujo predominante.

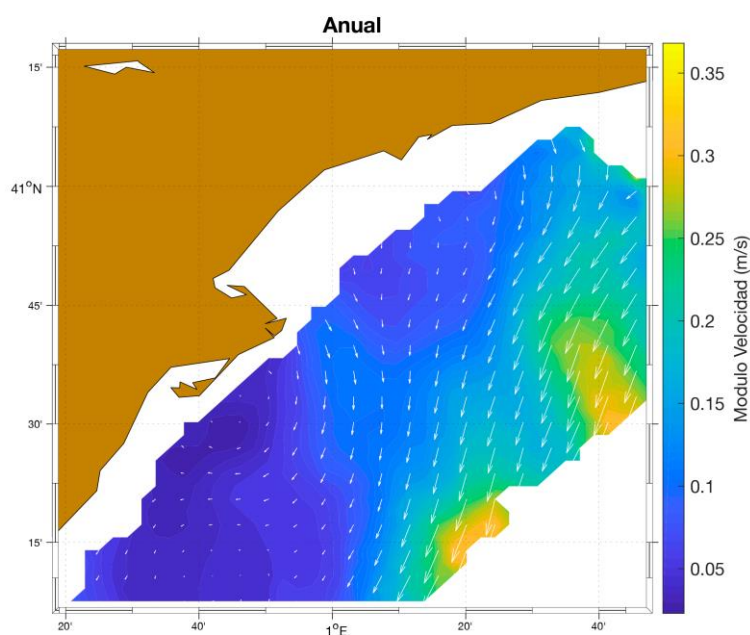


Figura 6.8: Circulación promedio anual para la zona del Delta del Ebro durante el año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

Durante el invierno, el promedio estacional de las corrientes superficiales (Figura 6.9) mostró una corriente con una velocidad más elevada que superó los $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ en las zonas más alejadas de Tarragona y el delta. Dicho flujo fue el producto de una ramificación de dos flujos con velocidades inferiores a $35 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ provenientes de la zona N del delta y la zona noreste de la costa catalana, como ya mostró el estudio anual. Además, tanto la línea de costa, que actúa a modo de barrera, como la acción del viento dieron como resultado dos remolinos anticiclónicos a ambos lados del delta, uno en la región NE y otro al sur (Puntos A y B en la Figura 6.9), como ya se comentó en el apartado 3.

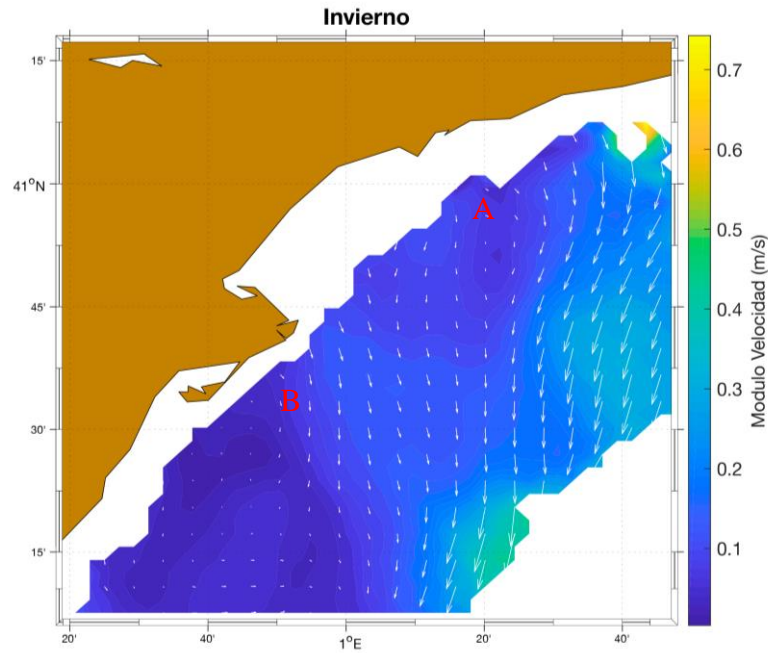


Figura 6.9: Circulación promedio para la estación de invierno (enero, febrero y marzo) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

A continuación se muestran los promedios mensuales de las corrientes superficiales para los diferentes meses que componen la estación de invierno (Figuras 6.10, 6.11 y 6.10). Se puede ver como tanto en magnitud como en dirección, los resultados de cada mes son parecidos al resultado estacional.

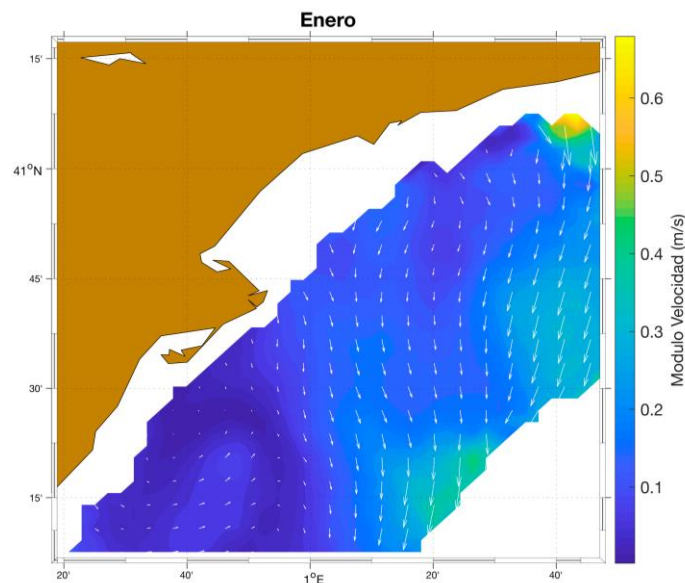


Figura 6.10: Circulación promedio para el mes de enero del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

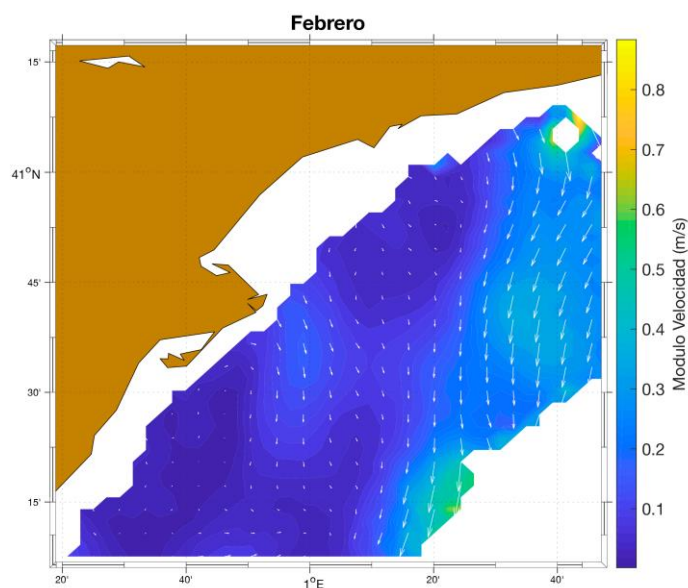


Figura 6.11: Circulación promedio para el mes de febrero del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

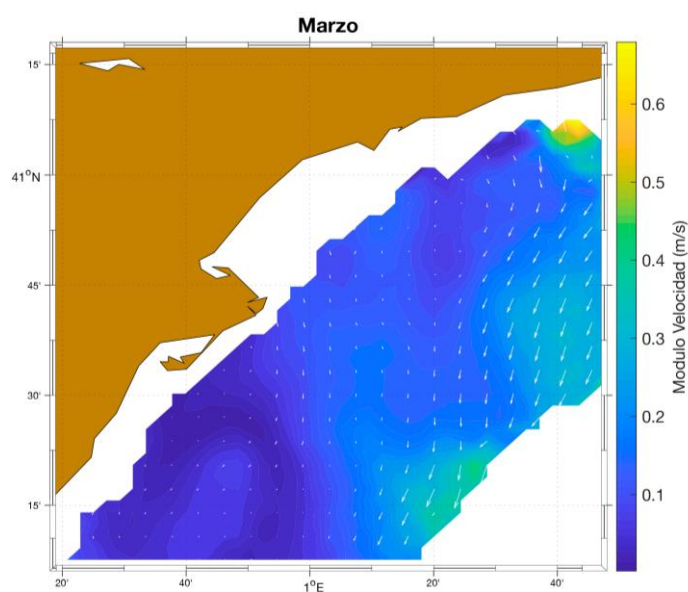


Figura 6.12: Circulación promedio para el mes de marzo del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

El patrón de circulación de las corrientes superficiales durante la estación de primavera (Figura 6.13) presentó una estructura similar al patrón de las corrientes del promedio anual (Figura 6.8).

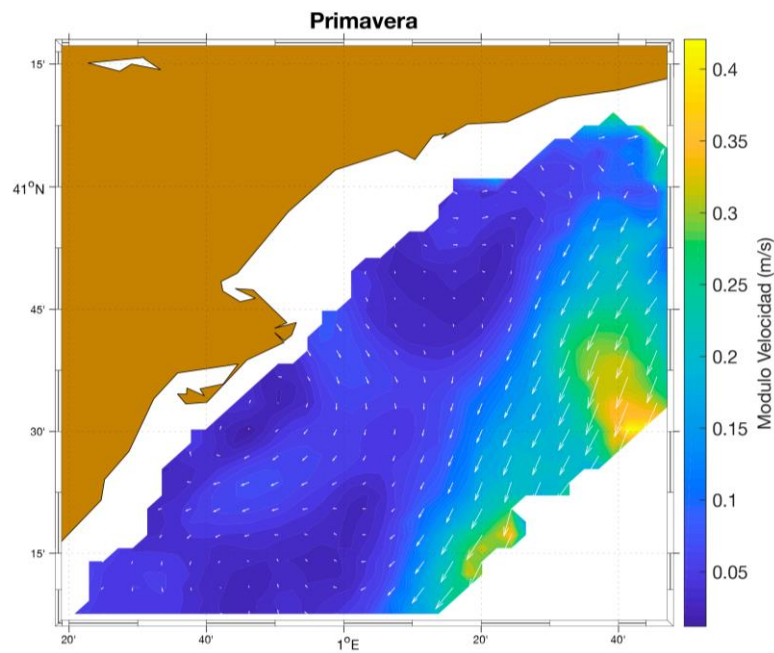


Figura 6.13: Circulación promedio para la estación de primavera (abril, mayo y junio) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

A continuación se muestran los promedios mensuales de las corrientes superficiales para los diferentes meses que componen la estación de primavera (Figuras 6.14, 6.15 y 6.16). Se puede ver que los resultados de cada mes son parecidos excepto en el mes de junio, donde la velocidad de la corriente en alguna zona disminuye respecto al análisis estacional.

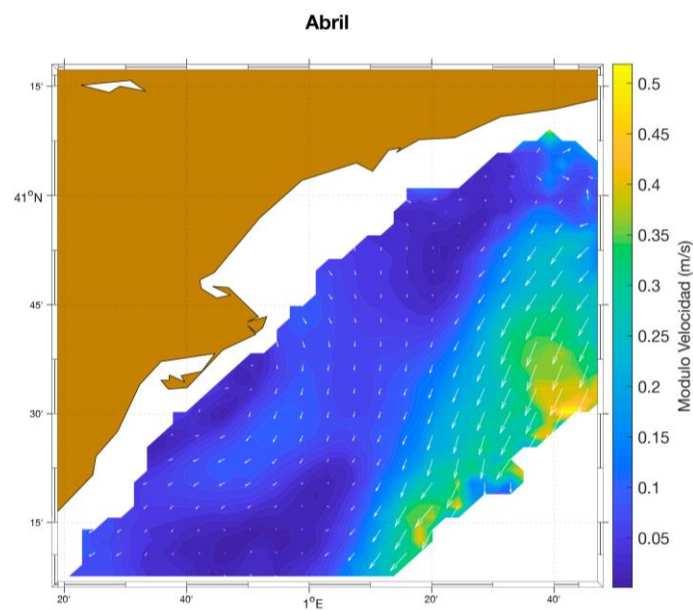


Figura 6.14: Circulación promedio para el mes de abril del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

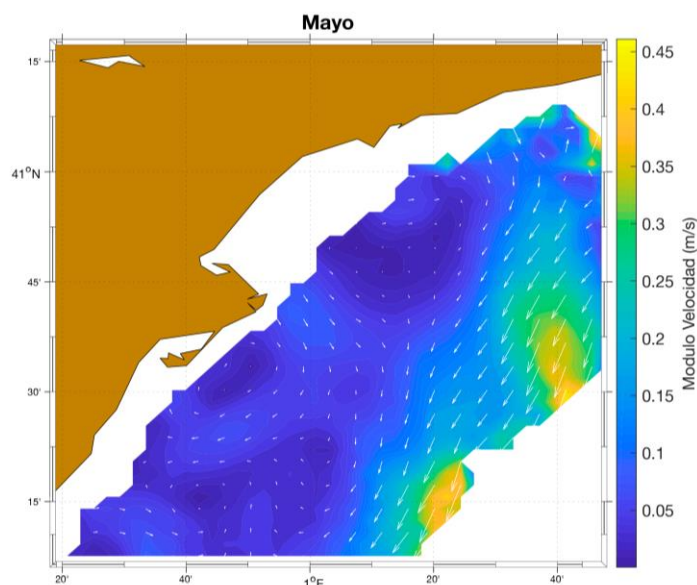


Figura 6.15: Circulación promedio para el mes de mayo del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

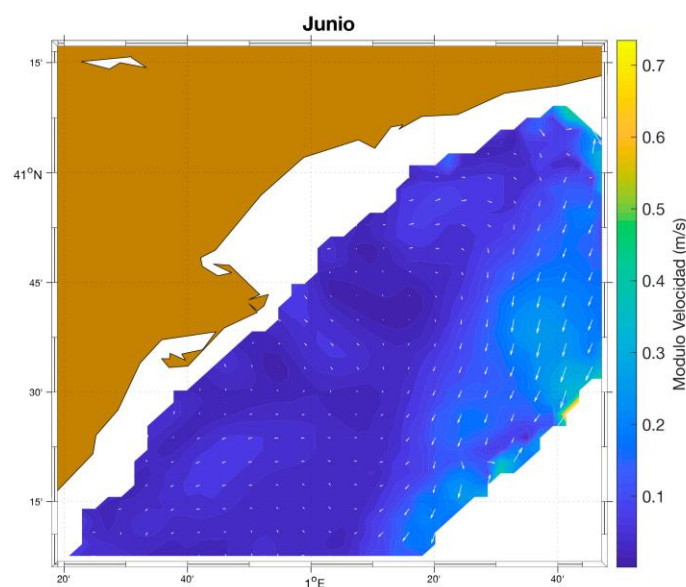


Figura 6.16: Circulación promedio para el mes de junio del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

El promedio estacional de la circulación superficial durante el verano presentó un patrón de comportamiento similar al promedio anual con una corriente predominante de mesoescala ($35\text{-}40\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) proveniente del NE en las zonas más expuestas al mar (Figuras 6.17 y 6.8). Como diferencia con respecto al patrón promedio de todo el año, y parecido al patrón del promedio estacional de los meses de invierno, se observó con mayor claridad aunque con corrientes más débiles, la presencia de remolinos

anticiclónicos situados en las regiones cercanas a la costa del delta provocados por los flujos de agua generados por el viento y la línea de costa (Puntos A y B en la Figura 6.17). Cabe destacar también que durante esta estación del año, los valores promedio de la velocidad fueron menores que durante la estación de invierno.

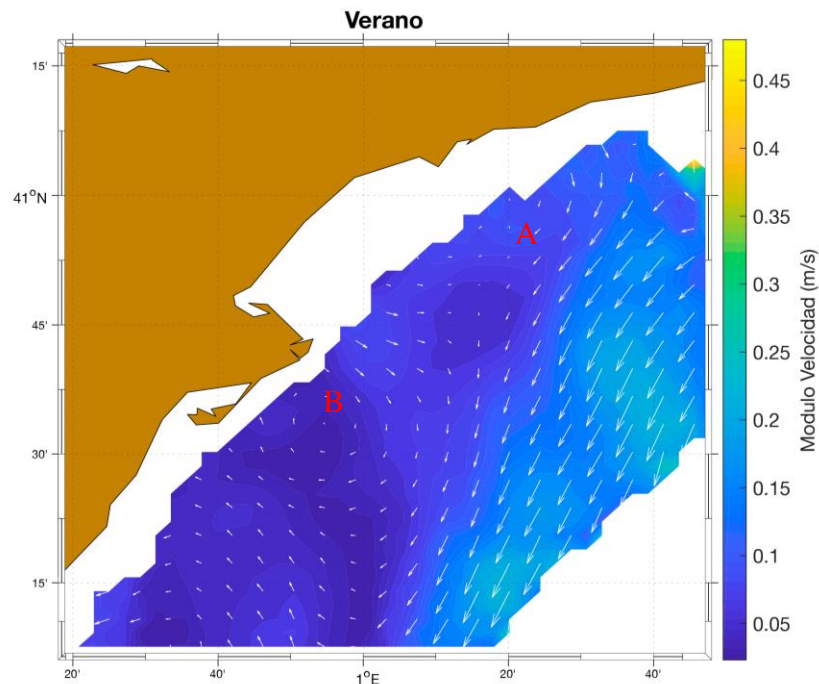


Figura 6.17: Circulación promedio para la estación de verano (julio, agosto y septiembre) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

A continuación se muestran los promedios mensuales de las corrientes superficiales para los diferentes meses que componen la estación de verano (Figuras 6.18, 6.19 y 6.20). Se puede ver que los resultados de cada mes son parecidos al resultado estacional excepto en el mes de julio y agosto, donde se aprecian con mejor claridad los remolinos anticiclónicos a cada lado del delta.

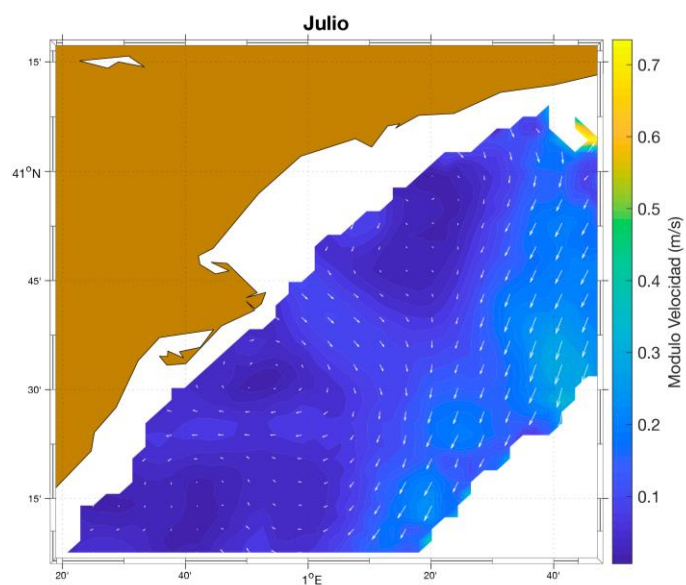


Figura 6.18: Circulación promedio para el mes de julio del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

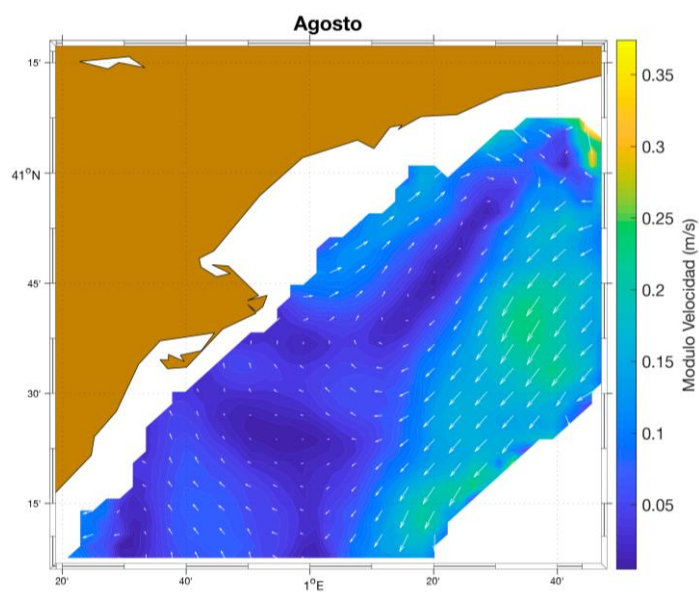


Figura 6.19: Circulación promedio para el mes de agosto del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

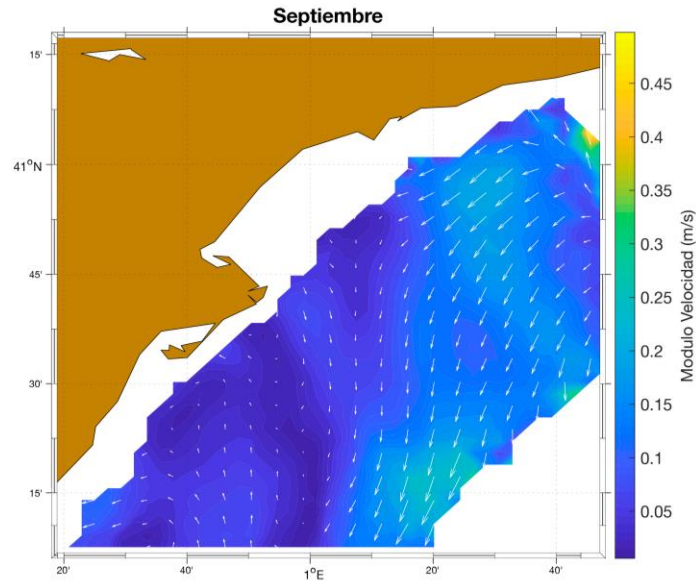


Figura 6.20: Circulación promedio para el mes de septiembre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

Finalmente durante el otoño (Figura 6.21), el patrón de circulación promedio de las corrientes superficiales se caracterizó por un flujo paralelo cercano a la costa de Tarragona con dirección hacia al SW que se unió al flujo provocado por la interacción de las corrientes con el contorno sólido del delta. Estos patrones fueron similares a los registrados durante el verano (Figura 6.17). Como diferencia entre las dos estaciones del año, cabe destacar que durante el otoño se observaron velocidades de las corrientes más elevadas y parecidas a las de invierno (Figura 6.9), con una circulación sin remolinos y más paralela a la costa.

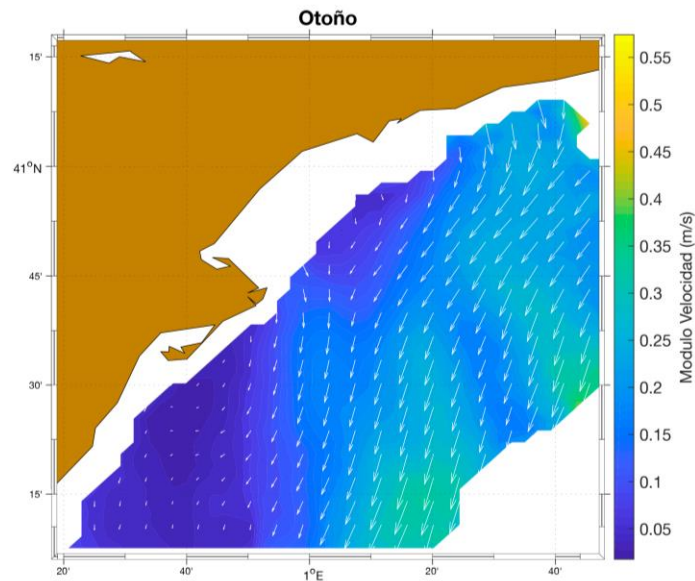


Figura 6.21: Circulación promedio para la estación de otoño (octubre, noviembre y diciembre) del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

A continuación se muestran los promedios mensuales de las corrientes superficiales para los diferentes meses que componen la estación de otoño (Figuras 6.22, 6.23 y 6.24). Se puede ver que los resultados de cada mes son parecidos al resultado estacional.

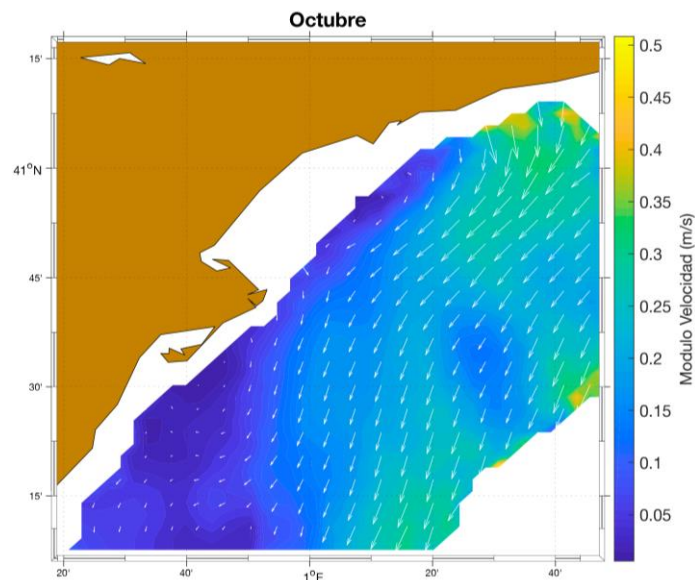


Figura 6.22: Circulación promedio para el mes de octubre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

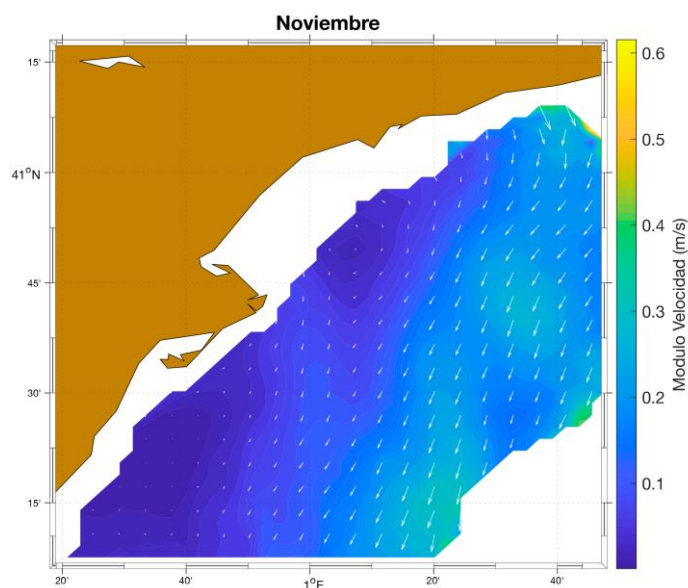


Figura 6.23: Circulación promedio para el mes de noviembre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

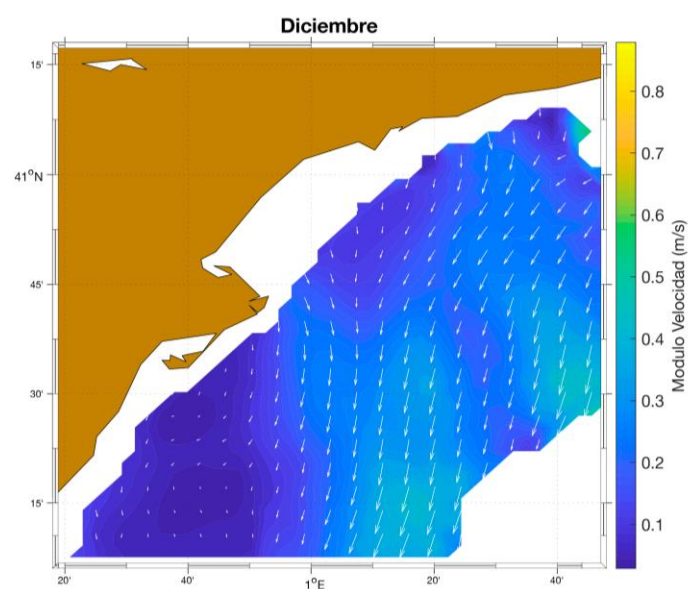


Figura 6.24: Circulación promedio para el mes de diciembre del año 2014. Las flechas blancas indican la dirección del viento y la escala de colores el módulo de la velocidad.

6.2.2. Elipses de variabilidad

Se presenta la variabilidad anual y estacional de las corrientes superficiales mediante sus elipses de variabilidad. Para facilitar su posterior correlación vectorial con los vientos del ECMWF, se interpolan las series de corrientes superficiales a los nodos correspondientes a los datos de viento, puesto que la cobertura espacial de los

datos de corrientes superficiales es mayor que la de los datos de viento, con una malla de 1069 nodos respecto a una de 270 nodos, no coincidentes entre sí. Además, las series de tiempo de las corrientes superficiales fueron promediadas espacialmente con la finalidad de obtener parámetros representativos de las elipses de variabilidad de la región estudiada (Tabla IV).

En el análisis anual (Figura 6.25 y Tabla IV) se observaron elipses de variabilidad bien definidas en la mayor parte de la región, con una excentricidad promedio de 0.64 y una desviación estándar del eje de mayor variabilidad de $1.95 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Se utilizó una comparación de la magnitud promedio y la variabilidad de las corrientes superficiales, en donde el parámetro β (igual a 3.15) indicó un dominio de la circulación promedio sobre la variabilidad en gran parte de esta zona, excepto en el área sur cercana al delta donde se vio que la variabilidad dominó sobre la circulación promedio. El ángulo de inclinación de la elipse promedio fue de -22.65° con respecto al este.

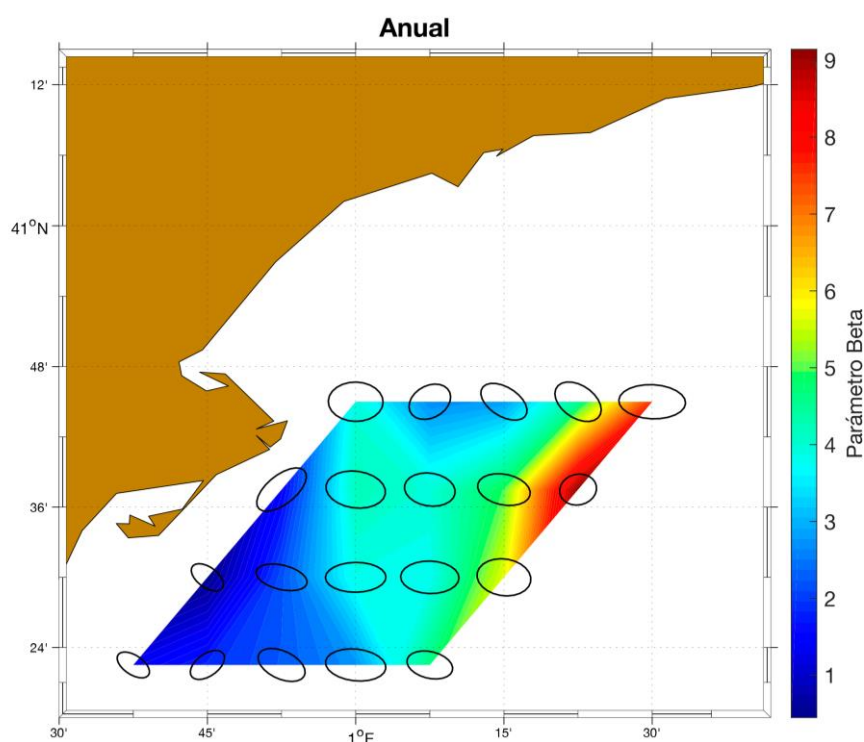


Figura 6.25: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para el año 2014. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.

Los valores promedio de los parámetros de las elipses de variabilidad obtenidos para el invierno fueron ligeramente distintos en varios factores a los obtenidos en el análisis anual (Figuras 6.25, 6.26 y Tabla IV). Se observaron elipses mejor definidas en la zona cercana al delta pero con una menor desviación estándar promedio del eje de mayor variabilidad ($1.79 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) respecto al estudio anual. El parámetro β (igual a 4.98) mostró que en la zona cercana a la costa la variabilidad domina sobre la magnitud de la circulación promedio, efecto muy parecido al que se encontró en las elipses de variabilidad de todo el año. Por último, el ángulo de inclinación de la elipse promedio fue de 20.60° respecto al este.

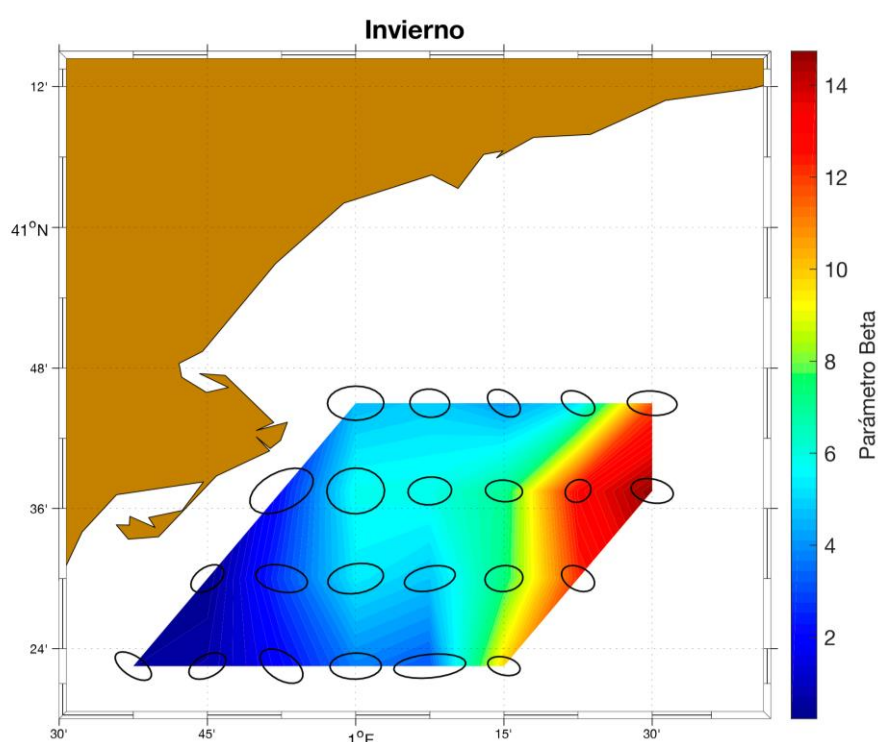


Figura 6.26: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de invierno del año 2014, compuesta por los meses de enero, febrero y marzo. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.

En cuanto a la primavera (Figura 6.27 y Tabla IV), los resultados de la elipse de variabilidad promedio fueron bastante diferentes a los obtenidos en el estudio anual. El análisis mostró elipses más circulares en toda la zona, con una desviación estándar del eje de mayor variabilidad de $2.12 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Como única similitud, destacar que el parámetro β (igual a 2.23) indicó un dominio de la circulación promedio sobre la

variabilidad en gran parte de la zona, menos en la zona sureste al delta. El ángulo de inclinación de la elipse promedio fue de 19.10° respecto al este.

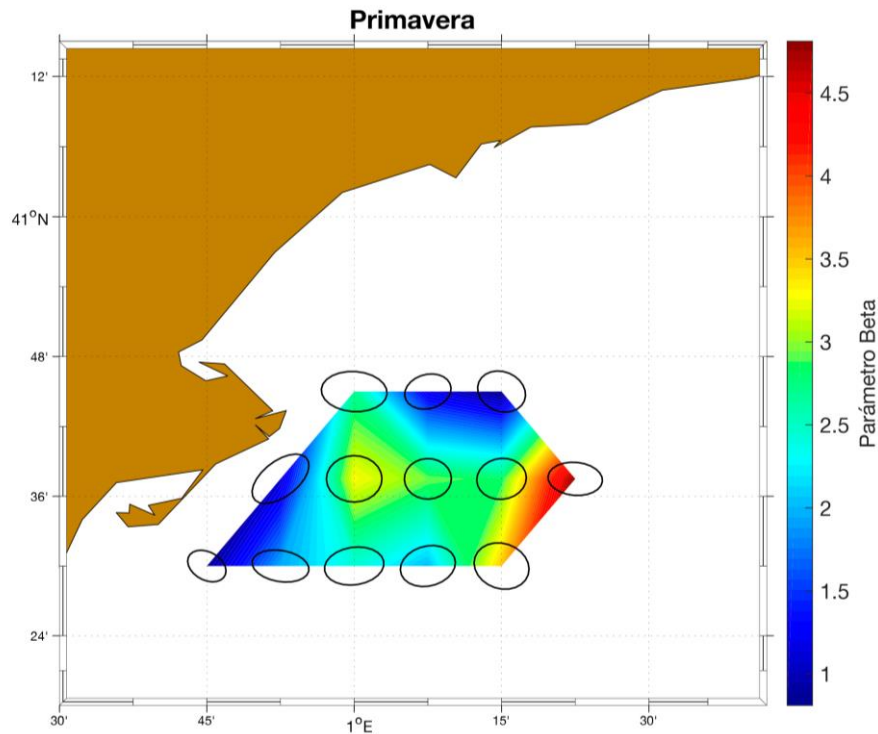


Figura 6.27: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de primavera del año 2014, compuesta por los meses de abril, mayo y junio. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.

Las elipses de variabilidad durante el verano (Figura 6.28) fueron las que dieron el resultado más similar a las parámetros obtenidos en las elipses de variabilidad anual con un promedio de desviación estándar del eje de mayor variabilidad de $1.84 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Como diferencia el parámetro β (igual a 3.02) mostró la presencia de corrientes más débiles y un dominio de la variabilidad sobre la magnitud de la circulación superficial en la mayor parte de la zona, sobretodo en la más cercana a la costa del delta. El ángulo de inclinación de la elipse promedio fue de -22.55° respecto al este.

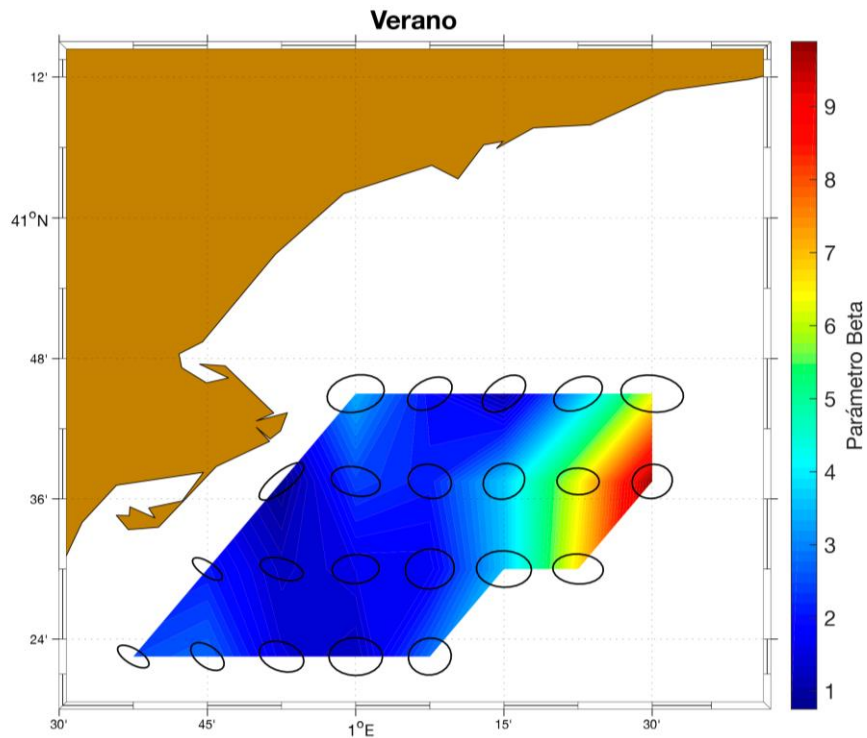


Figura 6.28: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de verano del año 2014, compuesta por los meses de julio, agosto y septiembre. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.

Por último, en la estación de otoño (Figura 6.29 y Tabla IV) encontramos elipses de variabilidad bien definidas con un promedio de desviación estándar del eje de mayor variabilidad de $1.85 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, resultado muy próximo al promedio en la estación de verano. Por otro lado, el parámetro β (igual a 8.34) mostró un comportamiento similar al resto de estaciones del año, con valores crecientes desde las cercanías del delta a la zona más expuesta al mar, que reflejan un dominio de la variabilidad sobre la corriente en la región deltaica y el fenómeno contrario en el resto del área de estudio. El ángulo de inclinación de la elipse promedio fue de -20.02° respecto al este.

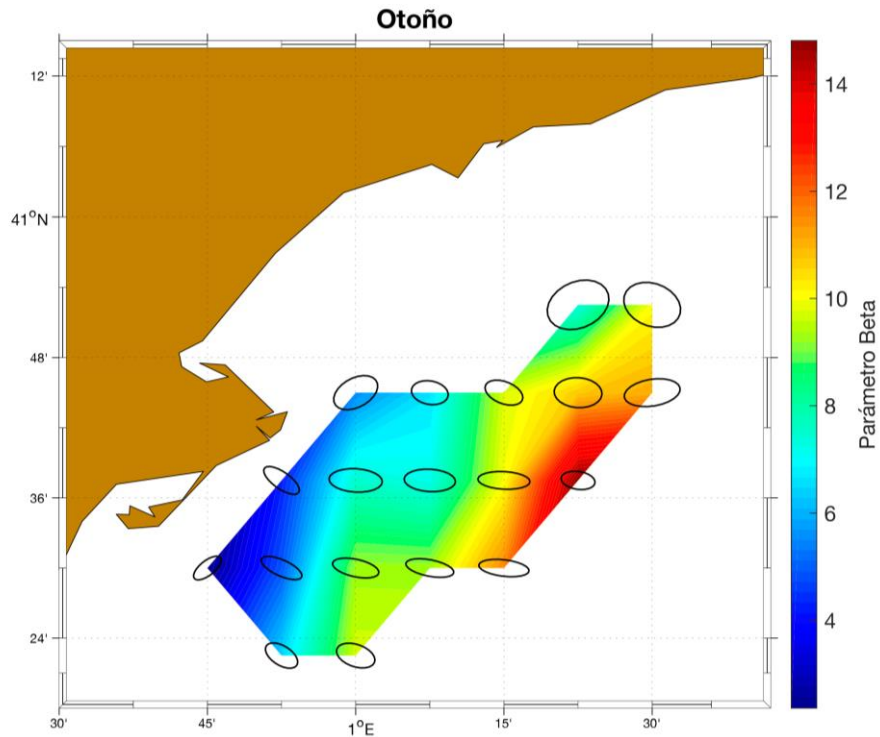


Figura 6.29: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para la estación de otoño del año 2014, compuesta por los meses de octubre, noviembre y diciembre. La barra de colores representa la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad.

El análisis de elipses de variabilidad mostró un marcado contraste estacional, con una mayor variabilidad de la circulación superficial durante las estaciones de invierno y verano. Este mismo patrón de comportamiento fue registrado en los datos de viento, lo cual sugiere que la corriente superficial pudiera responder a las variaciones estacionales del viento. Además, señalar que los ángulos de inclinación promedio resultaron ser de valores muy similares, con un cambio de tendencia en la dirección a partir de la estación de verano.

Tabla IV: Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio de la corriente superficial durante las diferentes estaciones del año 2014. **Mag** representa la magnitud promedio de la corriente superficial, S_u es el eje de mayor variabilidad, S_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre la magnitud promedio del viento y la desviación estándar del semieje mayor de la elipse, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.

	Mag (cms^{-1})	S_u (cms^{-1})	S_v (cms^{-1})	β	π	θ ($^\circ$)
Anual	6.36	1.95	1.24	3.15	0.64	-22.65
Invierno	8.43	1.79	1.06	4.98	0.60	20.60
Primavera	4.81	2.12	1.62	2.23	0.77	19.10
Verano	5.53	1.84	1.25	3.02	0.68	-22.55
Otoño	15.56	1.85	1.08	8.34	0.57	-20.02

6.2.3. Correlación vectorial entre el viento y las corrientes superficiales

Con la finalidad de estimar la covarianza entre las velocidades totales entre el viento medido y las corrientes superficiales en el delta del Ebro, se aplicó una correlación vectorial entre la magnitud de las series de tiempo.

Tanto para los resultados de la correlación vectorial anual (Figura 6.30) como para las estaciones de primavera (Figura 6.32), verano (Figura 6.33) y otoño (Figura 6.34), la amplitud de la correlación fue mayor (entre 0.4 y 0.5) en la zona cercana al delta. Durante el invierno (Figura 6.31), aunque se dieron amplitudes de correlación del mismo orden en la misma zona, las amplitudes de mayor rango en esta estación (entre 0.55 y 0.6) se dieron en la zona más alejada a la costa y más cercana al mar Mediterráneo. Aún así, donde las series de tiempo mostraron un mejor acoplamiento fue en la zona cercana al delta durante las estaciones de invierno y de otoño.

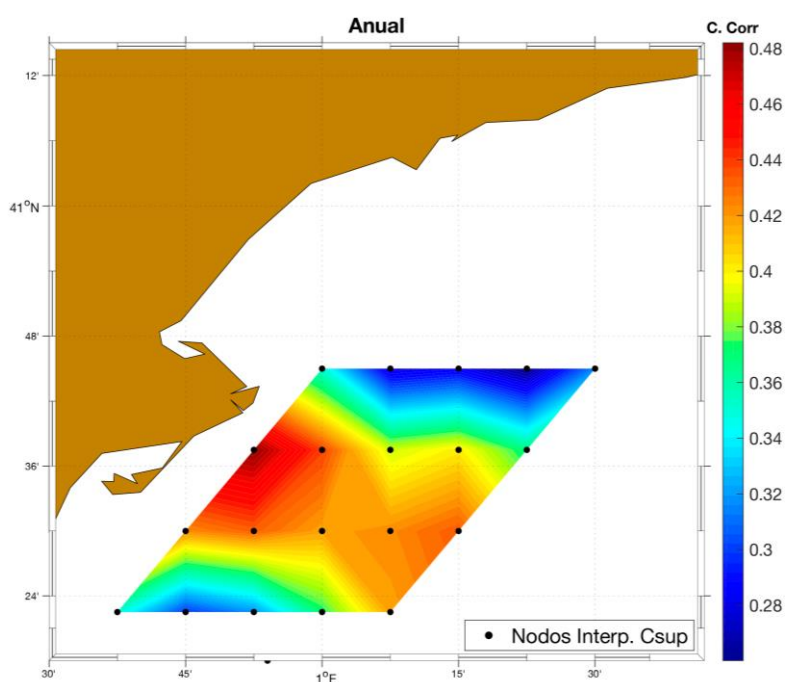


Figura 6.30: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales.

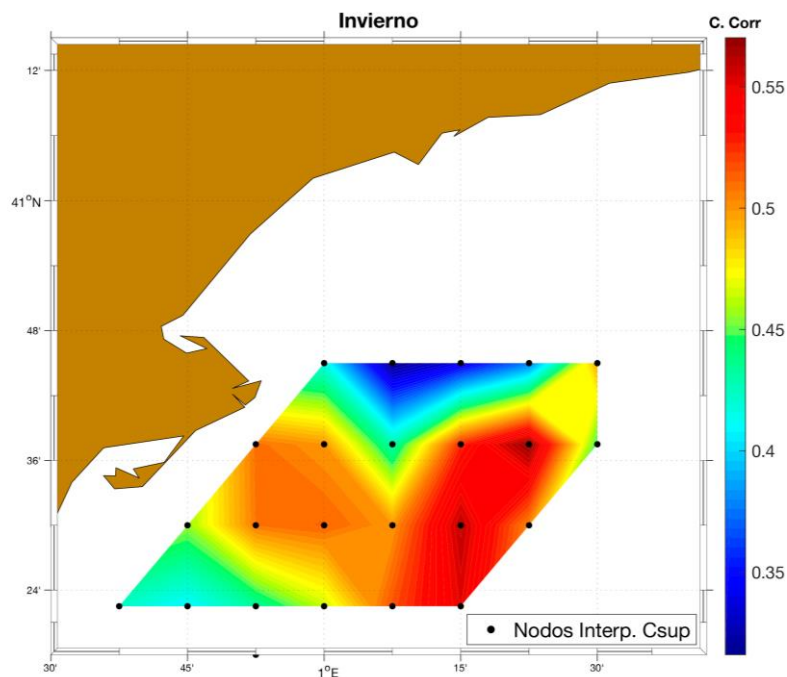


Figura 6.31: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de invierno durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales.

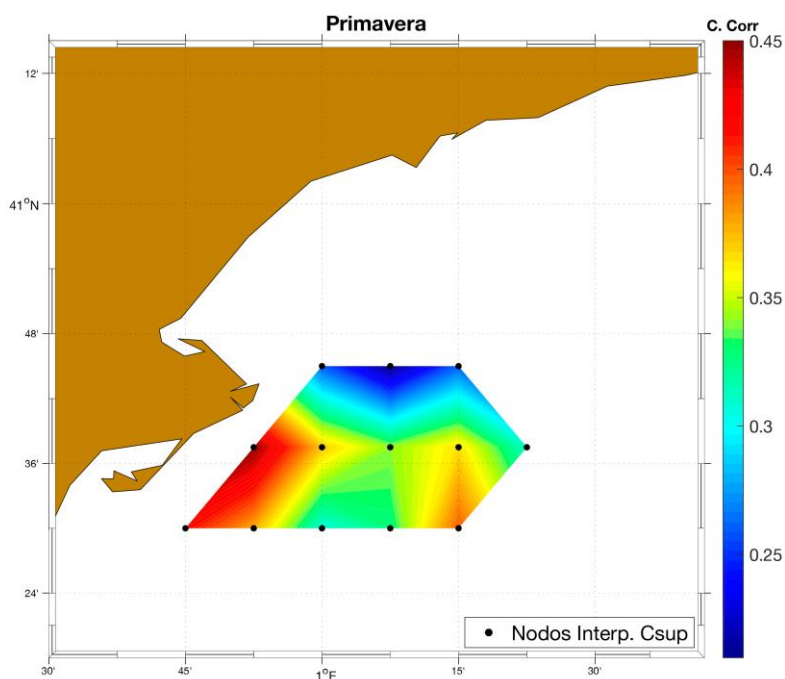


Figura 6.32: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de primavera durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales.

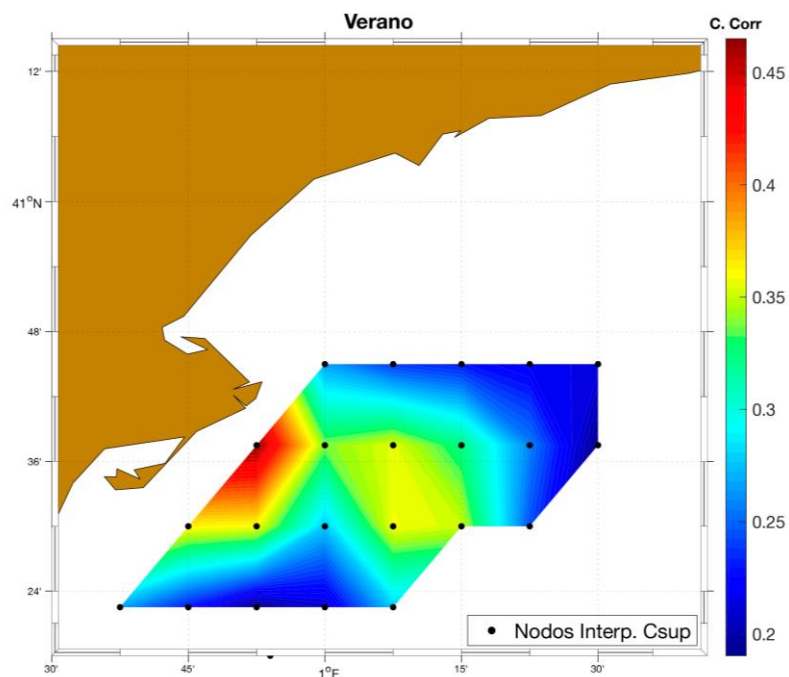


Figura 6.33: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de verano durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales.

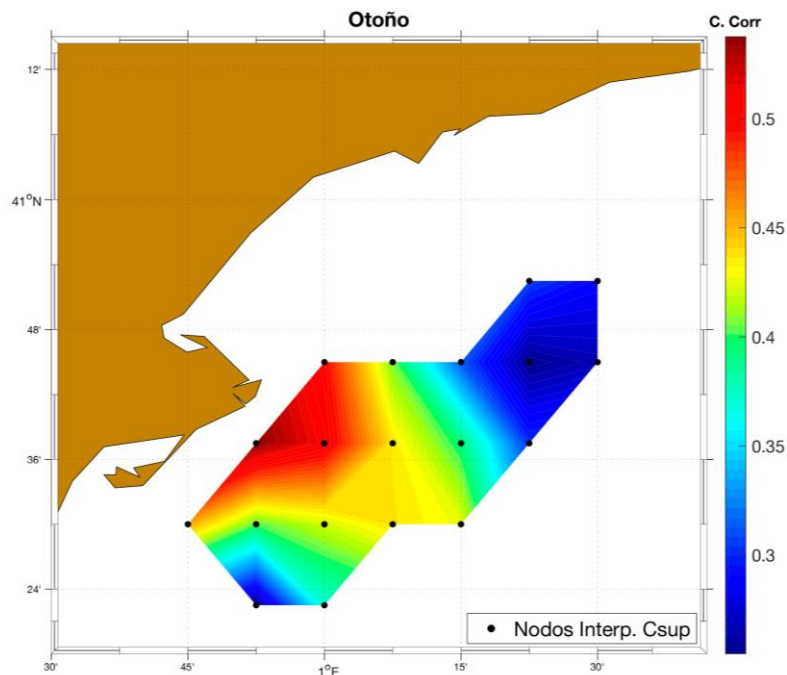


Figura 6.34: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de otoño durante el año 2014. La barra de colores indica el coeficiente de correlación vectorial. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales.

6.2.4. Análisis espectral y coherencia

Con la finalidad de identificar las oscilaciones más representativas en las series de tiempo del viento y las corrientes superficiales, se aplicó un análisis espectral y un filtro pasa-banda o *band-pass* (filtrado digital) mediante el método del periodograma promedio de Welch para comparar los datos obtenidos tanto en dos puntos de ambos datos (la boya de Tarragona para el viento y el nodo de las corrientes superficiales más cercano a la boya) como en todos los nodos de la malla. Posteriormente se utilizó el análisis de coherencia para ver las frecuencias en las que existe una mayor interacción entre los espectros del viento y las corrientes superficiales.

Al tener medidas horarias diferentes en las dos series de tiempo a analizar (datos cada hora para las corrientes superficiales y cada 6 horas para el viento), se llevó a cabo previamente un remuestreo de los datos de corriente superficial, consiguiendo así que los datos horarios quedaran definidos igual que los del viento, cada 6 horas.

Primero, se aplicó el análisis espectral para dos puntos representativos de cada conjunto de datos. Los puntos utilizados fueron la boya de Tarragona para el viento y el nodo más cercano a ella para los corrientes superficiales (Figura 6.35).

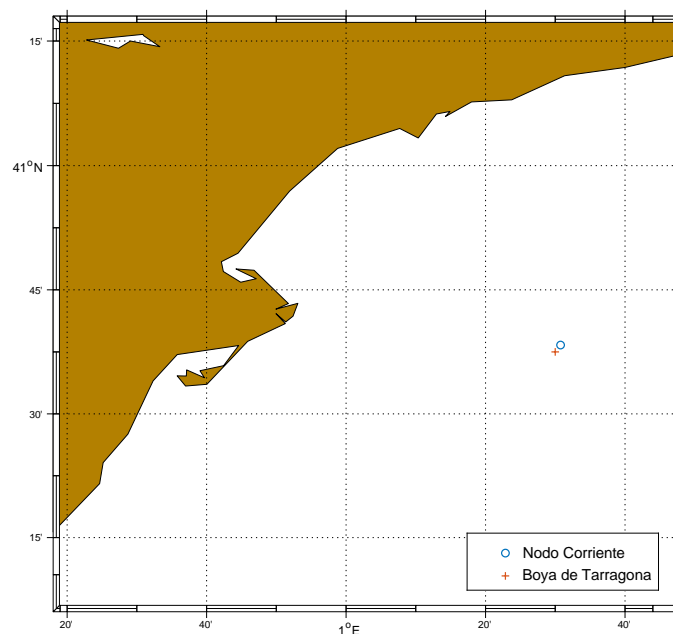


Figura 6.35: Representación de los dos puntos de estudio para el análisis espectral de los datos de viento y corrientes superficiales durante el año 2014.

Para poder obtener el análisis espectral de forma adecuada en ambos puntos y poder así observar de cada uno de los datos, las frecuencias que presentan mayor energía, se complementó el análisis con una corrección del nivel medio de los datos temporales por medio de una función ventana (Figuras 6.36a y 6.36b). Esta consideración fue necesaria ya que para obtener de manera fiable el análisis espectral se tiene que trabajar con series estacionarias. Si la señal no es corregida, se introduce en el espectro una distorsión denominada efecto de solapamiento que, por ejemplo, para los corrientes superficiales puede ser debida a las frecuencias propias de la marea. De esta manera, se trataron las señales de entrada para obtener señales sin tendencia (estacionarias) y lograr nuevos datos de viento y corrientes superficiales para realizar el análisis espectral definitivo (Figura 6.37a y 6.37b).

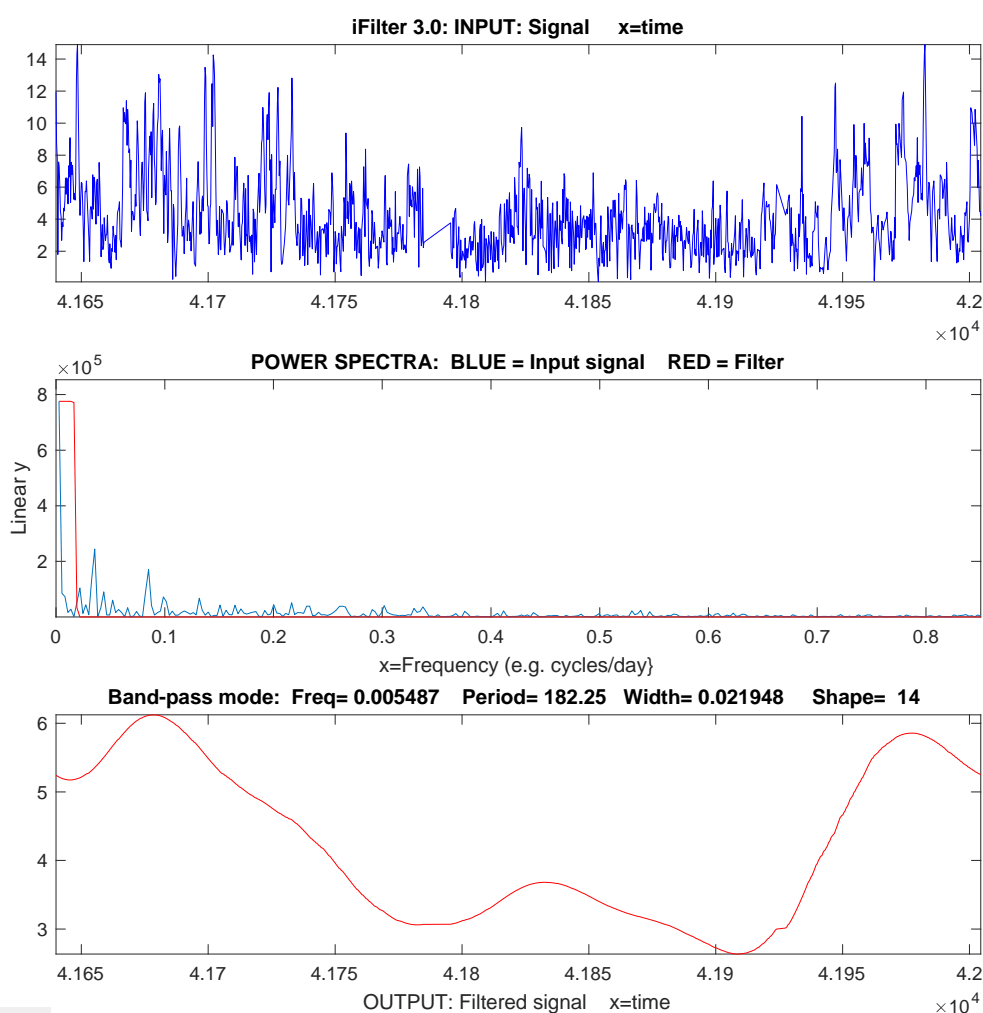


Figura 6.36a: Análisis espectral sin corregir de los datos de viento de la boya de Tarragona durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones de largo periodo en la señal de entrada.

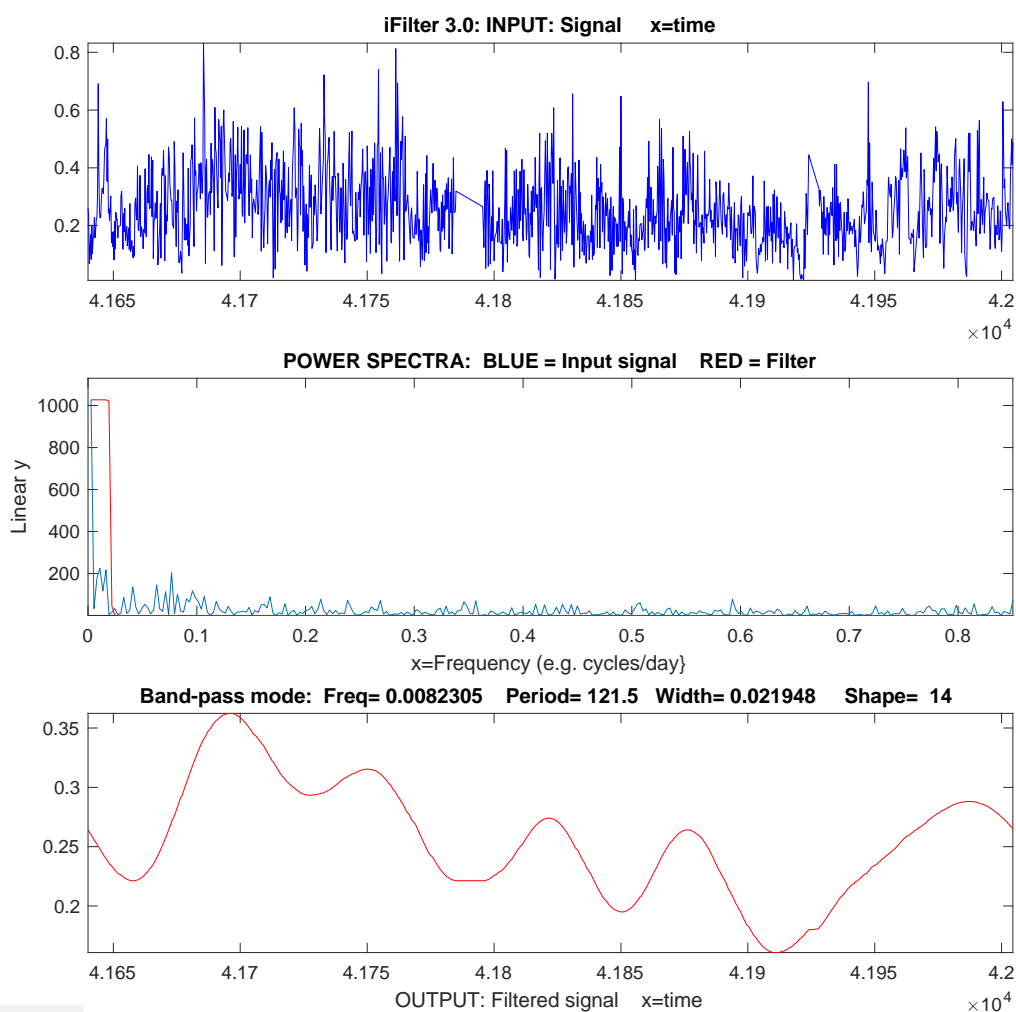


Figura 6.36b: Análisis espectral sin corregir de los datos del nodo de corrientes superficiales durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones de largo periodo en la señal de entrada.

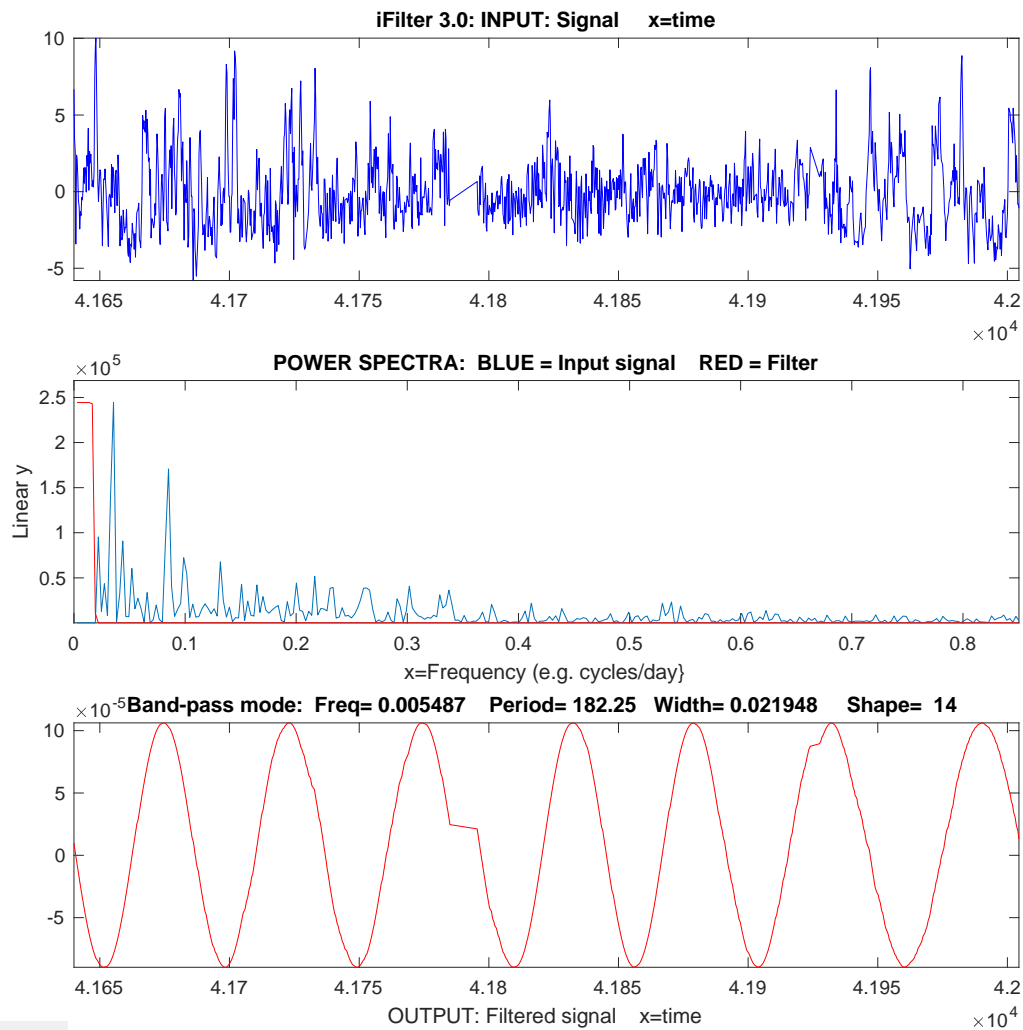


Figura 6.37a: Análisis espectral una vez aplicada la corrección o filtro (onda estacionaria) de los datos de viento de la boyta de Tarragona durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones de largo periodo en la señal de entrada.

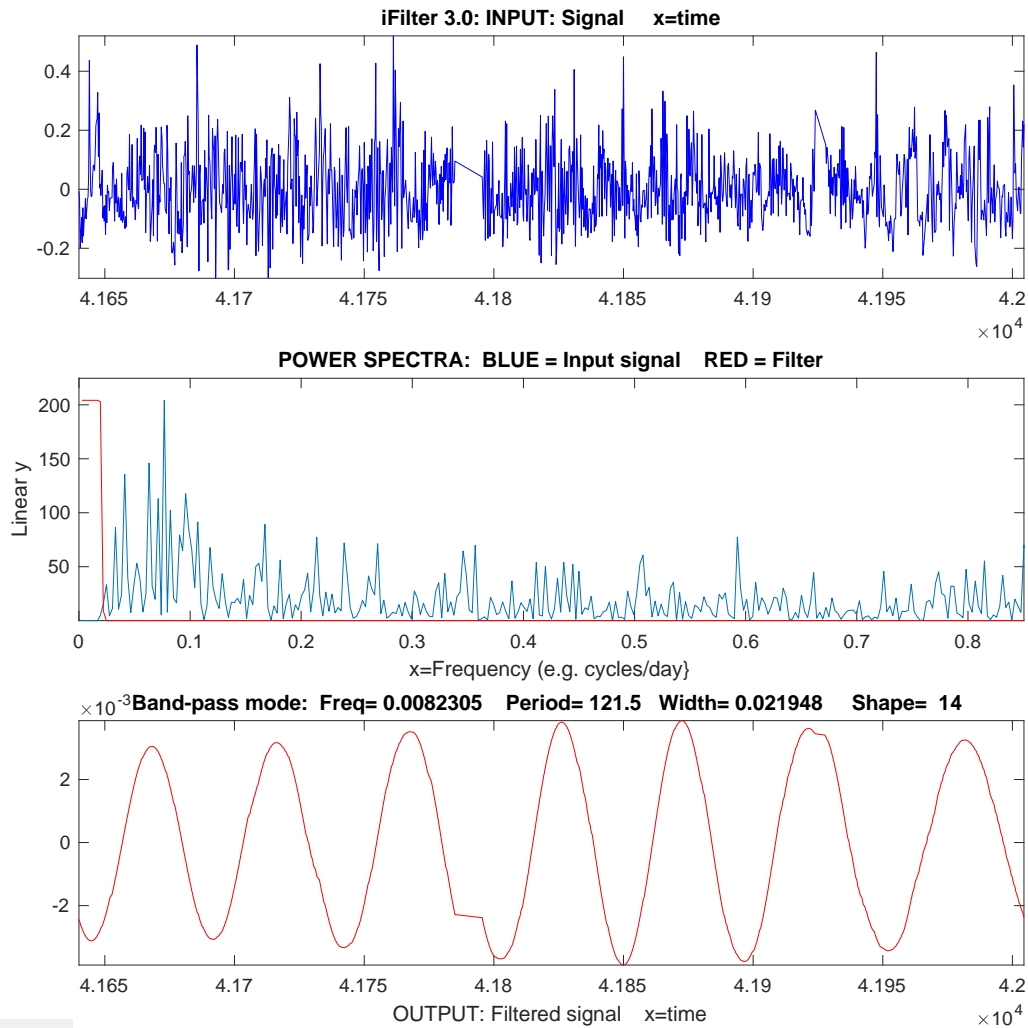


Figura 6.37b: Análisis espectral una vez aplicada la corrección o filtro (onda estacionaria) de los datos del nodo de corrientes superficiales durante el año 2014. De arriba abajo, los gráficos representan la serie temporal de entrada, el análisis espectral y las oscilaciones de largo periodo en la señal de entrada.

Una vez aplicado el análisis espectral y la técnica de espectros cruzados en los dos puntos, se procedió a compararlos para observar similitudes y diferencias entre las oscilaciones de cada uno.

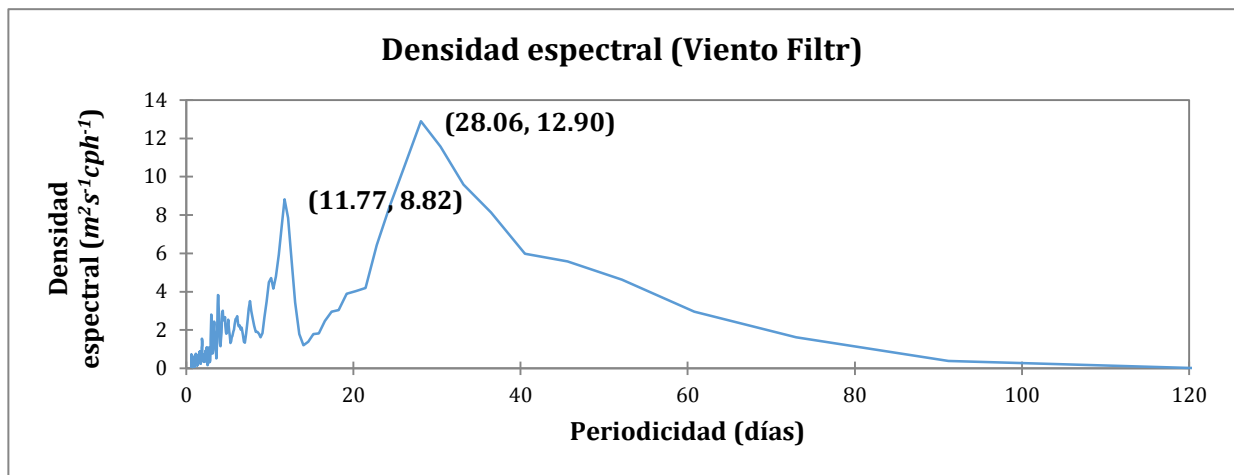


Figura 6.38: Análisis espectral definitivo de los datos de viento de la boya de Tarragona durante el año 2014.

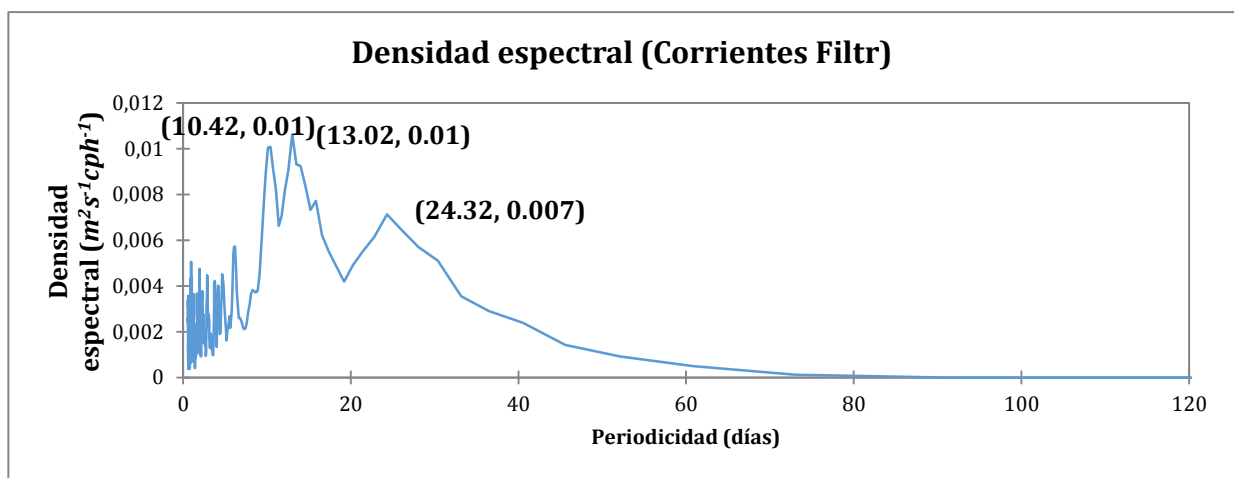


Figura 6.39: Análisis espectral definitivo para un nodo de la malla de los datos de corriente superficial durante el año 2014.

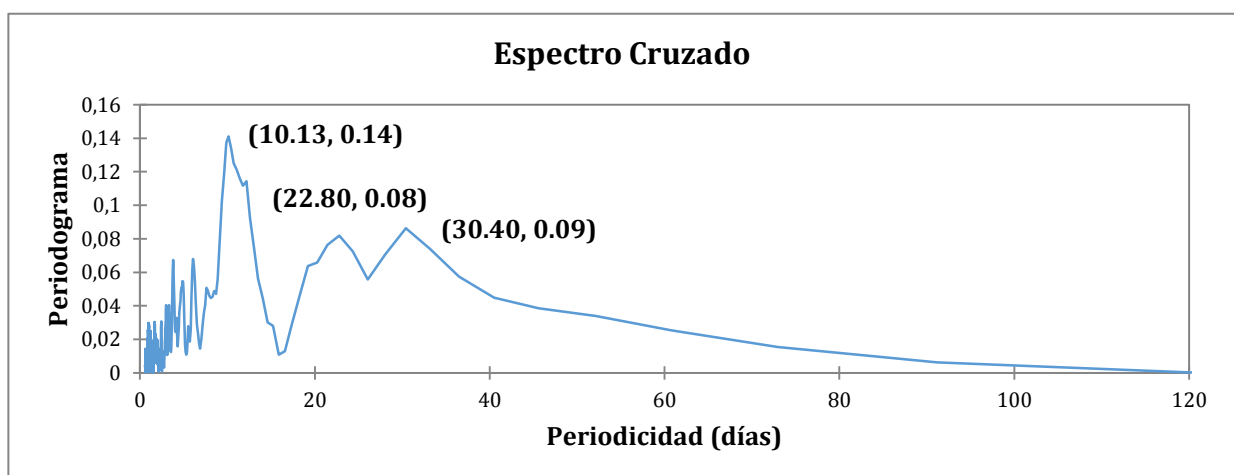


Figura 6.40: Espectro cruzado entre los espectros del viento y las corrientes superficiales para los dos puntos representativos de la malla durante el año 2014.

El espectro de potencia del viento (Figura 6.38) mostró que las bandas con mayor energía fueron las correspondientes a periodos de 28 y 12 días. Se observó otro pico de energía importante con un periodo de 121 días, el cual al no encontrarse bien definido fue eliminado en el filtrado al presentar una menor confiabilidad estadística.

En cuanto al espectro de potencia de las corrientes superficiales (Figura 6.39) indicó que las bandas más energéticas presentaron periodos de 24, 13 y 10 días. Se observó otro pico de energía importante con un periodo de 182 días, el cual al no encontrarse bien definido fue eliminado en el filtrado al presentar una menor confiabilidad estadística. Este mismo comportamiento fue registrado de forma similar en el análisis espectral de los datos del viento del ECMWF, donde las bandas con periodos de 28 y 12 días fueron más energéticas (Figura 6.38). Este hecho se observó en mayor profundidad con el análisis de espectros cruzados (Figura 6.40) que mostró periodos de 10, 23 y 30 días en las oscilaciones coincidentes de ambos espectros. Por tanto, esto sugiere que la corriente superficial pudiera ser influenciada por los procesos de viento con estos periodos.

Aplicado el análisis espectral y de coherencia para dos puntos representativos se procedió a analizar los nodos interpolados de la malla con datos de viento y corrientes superficiales.

Para observar con mayor perspectiva el análisis, se esquematizó la variación espacial de la coherencia (Figura 6.41). Los resultados mostraron coherencias bastante bajas en la mayor parte de la zona de estudio, presentando valores máximos de 0.24 en la región costera del delta. Se esperaba ver más relación entre ambos espectros, con coherencias de mayor nivel. No obstante, es probable que el desfase temporal que hay entre el viento como mecanismo impulsor y la corriente como respuesta, y la componente mareal inducida en nuestros modelos, pudieran diluir dicho efecto.

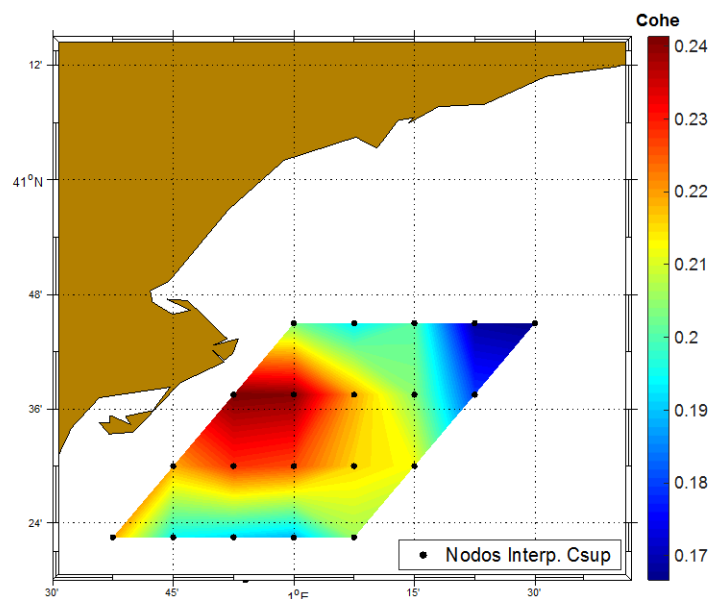


Figura 6.41: Variabilidad espacial de la coherencia entre los espectros del viento y las corrientes superficiales del año 2014. Los puntos negros muestran la posición de los nodos interpolados de las corrientes superficiales y la escala de colores indica la coherencia.

6.2.5. Análisis armónico

Con el propósito de estimar la variabilidad de las corrientes superficiales generadas por la marea, se hizo un análisis armónico basado en las frecuencias de los principales constituyentes de la marea astronómica.

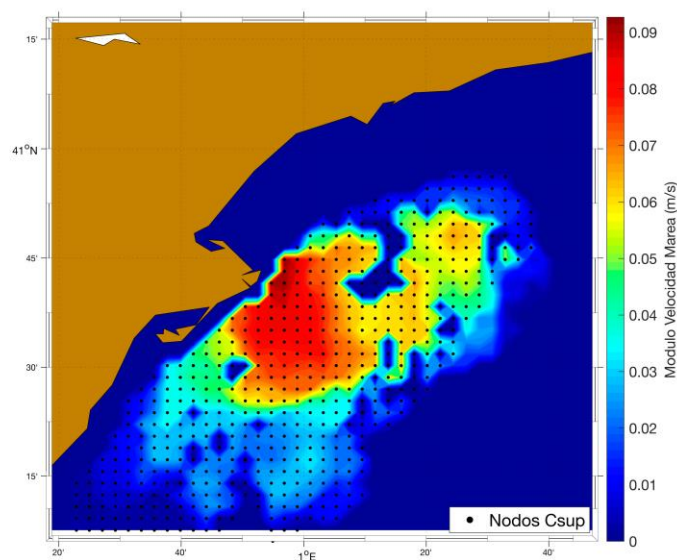


Figura 6.42: Variabilidad de la corriente superficial explicada por la marea para el año 2014. La barra de colores indica el módulo de la velocidad total de la circulación superficial que es explicada por la corriente de marea. Los puntos de color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.

El análisis mostró que durante el año 2014 (Figura 6.42), la variabilidad de las corrientes totales de los nodos que se encontraron en zonas con profundidades menores a 200 *m*, y en particular la región cercana a la punta del delta fueron las más influenciadas por procesos de marea con velocidades de 6-9 $cm \cdot s^{-1}$ seguramente debido al ensanchamiento de la plataforma continental y, por tanto, a la menor profundidad. A medida que nos alejamos de la costa, las regiones con profundidades más elevadas y con pendientes más pronunciadas presentaron una variabilidad explicada por la marea un poco más baja con velocidades de 2-4 $cm \cdot s^{-1}$. Las zonas más alejadas al delta y más expuestas al mar representaron la variabilidad de marea con menor velocidad, alrededor de 1-2 $cm \cdot s^{-1}$. Este comportamiento fue similar durante el resto de estaciones del año.

7. DISCUSIÓN

7.1. Viento

Los datos de viento indicaron que la zona del delta del Ebro presentó un sistema de brisas marcado durante la mayoría de meses del verano, con vientos de mar hacia tierra y de tierra hacia el mar de manera cíclica. Se observó también de manera notable la aparición de vientos más intensos de costa hacia el mar tanto de día como de noche durante la estación de invierno y vientos más moderados del mar hacia la costa durante la estación de verano. Dicho comportamiento se podría asociar al régimen eólico de la región, en el que durante el invierno se generan vientos denominados vientos de noroeste o *Mistral* y en verano vientos llamados vientos de suroeste o *Garbís* como se describe en el apartado 3.

Además, los análisis del viento demostraron que el verano fue la estación con menor variabilidad del viento en la región. Dicha variabilidad fue casi dos veces menor que durante el invierno. Aún así, se esperó ver más divergencia entre los resultados de ambas estaciones, con vientos más perpendiculares a la costa en verano pero es probable que la resolución temporal de los datos y la distancia de los puntos de estudio pudieran suavizar dicho efecto.

El análisis espectral mostró que en la boya de Tarragona los vientos más energéticos fueron los que tuvieron bandas con periodos mensuales (28 días) y quincenales (12 días).

7.2. Corrientes superficiales

Se observó que tanto para el promedio anual como en los promedios estacionales de la corriente superficial, existió un flujo predominante de agua proveniente del NE que recorrió toda la costa catalana que solo se vio alterado por la acción cíclica del viento, la forma deltaica de la línea de costa en el área de estudio y algunos periodos cortos de reversiones de corriente relacionados con una serie de remolinos anticiclónicos surgidos sobre todo en las estaciones más cálidas (primavera y verano), fenómeno que ya fue reportado por otros autores como Grifoll *et al.* (2015), Garreau

et al. (2011), Birol *et al.* (2010) y Font *et al.* (1990). Por otro lado, como presenta Font *et al.* (1995) en su estudio, la intensidad de las corrientes en todas las estaciones del año disminuyen de manera gradual a medida que se acercan a la costa del delta, con velocidades de circulación más intensas en los meses de invierno y otoño a causa de la variabilidad local del viento y una mayor actividad mesoescalar.

La corriente superficial presentó una marcada variación espacio-temporal en el delta. Se observó que durante el invierno (Figura 6.9), la variabilidad de la circulación superficial fue mayor que durante la estación de verano (Figura 6.17). Aun así, el parámetro β mostró, para todas las estaciones del año, el dominio de la corriente superficial sobre la variabilidad en la mayor parte del área de estudio excepto en las cercanías del delta donde el fenómeno se invirtió. Este suceso pudo ser generado por el efecto del viento, el cual presentó variaciones estacionales similares en su comportamiento.

El análisis espectral mostró que las bandas u oscilaciones más energéticas fueron las que presentaron periodos mensuales (24 días) y quincenales (10 y 13 días) como se puede ver en la Figura 6.39. Este comportamiento también se observó en los resultados del análisis espectral del viento, donde las bandas con mayor energía dieron periodos de 28 y 12 días. Esto sugiere que las corrientes superficiales con estos periodos pueden ser influenciadas por el viento.

El análisis armónico indicó que en los nodos más cercanos a la región deltaica y de menor profundidad (menos de 100 m) fueron más propensos a la influencia del efecto de marea con velocidades de alrededor de $6-9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ seguramente debido al flujo que se genera por los cambios en el nivel del mar. En el resto del área de estudio, la variabilidad explicada por la marea disminuyó casi a la mitad, dando como resultado velocidades de entre $2-4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

En general, se observó una relación importante entre el comportamiento del viento y las corrientes superficiales, en que el viento tuvo una notable influencia sobre la circulación superficial. El comportamiento cíclico del viento de tierra hacía el mar y del mar hacía tierra junto al efecto de la línea de costa pudieron ser los causantes de la desviación del flujo de agua predominante proveniente del NE que se aprecia en cada

una de las estaciones del año. Además, se observó que en las estaciones del año donde el viento actuó con mayor intensidad (invierno), las velocidades de las corrientes también aumentaron y dicho efecto fue más marcado. En cambio, las estaciones donde el viento fue de menor intensidad (verano), las velocidades de la circulación en la superficie del mar disminuyeron, del mismo modo que el comportamiento anteriormente descrito.

Sería recomendable realizar estudios más enfocados al proceso de marea o a las descargas de agua del río Ebro al mar Mediterráneo con y sin viento con la finalidad de ver cómo actúan sobre la circulación superficial a una menor escala temporal, así como el de otros mecanismos de forzamiento que puedan generar variabilidad sobre la corriente superficial en las proximidades del delta.

Página en Blanco

8. CONCLUSIONES

Los patrones de circulación superficial obtenidos mediante los radares de alta frecuencia en las proximidades del Delta del Ebro, presentaron una corriente predominante procedente del noreste consistente con la corriente de mesoescala propia de la zona que recorrió la línea de costa catalana de norte a sur. Se observó que dicha corriente junto a otros fenómenos locales que afectaron la región, dieron lugar a la generación de remolinos marinos de carácter anticiclónico en zonas puntuales y cercanas al delta.

La corriente superficial y el viento presentaron una mayor intensidad y variabilidad durante la estación de invierno, mientras que durante los meses de verano fueron más estables. Este hecho permitió observar que la circulación superficial en las proximidades del delta responde notablemente a las variaciones estacionales del viento.

Destacar que la morfología de la costa catalana junto a las variaciones espacio-temporales del viento jugaron un papel fundamental en cuanto a modificaciones de la dirección y la magnitud de las corrientes superficiales.

Por último, se podría considerar para trabajos futuros la realización de un estudio complementario a este trabajo para observar cómo afecta la batimetría del Delta del Ebro a la circulación superficial.

Página en Blanco

9. REFERENCIAS

- Birol, F., Cancet, M., Estournel, C.: Aspects of the seasonal variability of the Northern Current (NW Mediterranean Sea) observed by altimetry. *Journal of Marine Systems*, Vol. 81, pp. 297-311, 2010.
- Crombie, D. D.: Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*. 175, 681-682, 1955.
- Carrillo, J.A., Redondo, J.M., Fraunie, P., Durand, N.: Induced structures under seasonal flow conditions in the Ebro delta shelf. Laboratory and numerical models, *Il Nuovo Cimento*, Vol. 31, No 5-6, pp. 771-790, 2008.
- Emery, J. W., Thompson R. E.: *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon, pp. 634, 1998.
- Flores-Vidal, X., R. Durazo, C. Chavanne, P. Flament.: Coastal circulation in the absence of wind in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: High-frequency radar observations. *Ciencias Marinas*. 37, 493-512, 2011.
- Font, J., Julia, A., Rovira, J., Salat, J., Danchez-Pardo, J.: Circulación marina en la plataforma continental del Ebro determinada a partir de la distribución de masas de agua y los microcontaminantes orgánicos en el sedimento. *Acta Geologica Hispanica*, Vol. 21-22, pp. 483-489, 1987.
- Font, J., Salat, J., and Tintore, J.: Permanent features of the circulation in the Catalan Sea. *Pelagic Mediterranean Oceanography. Oceanologica Acta* 9 (vol. sp.), pp. 51-57, 1988a.
- Font, J., Salat, J., Wang, D.P.: Lagrangian and Eulerian observation of inertial oscillations in the shelf break offshore the Ebro River Delta (Catalan Sea, NW

- Mediterranean). Rapp. Comm. Int. Mer Médit 31: 201, 1988b.
- Font, J.: A comparison of seasonal winds with currents on the continental slope of the Catalan sea (Northwestern Mediterranean). *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. C2, pp. 1537-1545, 1990.
- Font, J., Garcia-Ladona, E. and Gorriz, E.G: The seasonality of mesoscale motion in the Northern Current of the Western Mediterranean: several years of evidence. *Oceanologica Acta*, Vol. 18, N2, pp. 207-219, 1995
- Godin, G.: Tides. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. pp. 290, 1988.
- Garreau, P., Garnier, V., Schaeffer, A.: Eddy resolving modeling of the Gulf of Lions and Catalan Sea. *Ocean Dynamics*, Vol. 61, pp. 991-1003, 2011.
- Grifoll, M., Aretxabaleta, A.L., Espino, M.: Shelf response to intense offshore wind. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, Vol. 120, doi:10.1002/2015JC010850, 2015.
- Kundu, P.: Ekman veering observed near the ocean bottom. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 6, pp. 238-242, 1976.
- Kohut, J.T., Glenn, S.M.: Improving HF radar surface current measurements with measured antenna beam patterns. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, pp. 1303–1316, 2003.
- Lipa B., D. E. Barrick.: Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 8, 226-253, 1983.
- Lipa, B., Nyden, B., Ullman, D.S., Terrill, E.: SeaSonde radial velocities: derivation and internal consistency. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31 (4), pp. 850–861, 2006.

Lorente, P., Piedracoba, S., Sotillo, M.G.: Characterizing the surface circulation in Ebro Delta (NW Mediterranean) with HF radar and modeled current data. *Journal of Marine Systems*, pp. 7, 2016.

Palanques, A., Guillen, J.: Costal changes in the Ebro Delta: natural and human factors, *Journal of Costal Conservation*, Vol. 4, pp. 17-26, 1998

Palanques, A., Puig, P., Guillen, J., Jimenez, J., Gracia, V., Sanchez-Arcilla, A., Madsen, O.: Near-bottom suspended sediment fluxes on the microtidal low-energy Ebro continental shelf (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, Vol. 22, pp. 285-303, 2002.

Salat, J., Garcia, M.A., Cruzado, A., Palanques, A., Arín, L., Gomis, D., Guillen, J., de León, A., Puigdefàbregas, J., Sospedra, J., Velásquez, Z.R.: Seasonal changes of water mass structure and shelf-slope exchanges at the Ebro Shelf (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, Vol. 22, pp. 327-348, 2002.